

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Vlahov

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

prof. dr. sc. Zoran Kožuh

Student:

Marko Vlahov

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru, dr.sc. Zoranu Kožuhu, na ukazanom povjerenju i pruženoj pomoći tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem asistentici dr.sc Tanji Tomić i docentu dr.sc Ivici Garašiću na pomoći i savjetima tijekom izrade rada.

Zahvaljujem gospodinu Živku Grčiću iz tvrtke Dok-Ing d.o.o. na pomoći pri izradi uzoraka za eksperimentalni dio diplomskog rada te djelatnicima katedre za precizno mjerenje dužina za pomoć pri mjerenju uzoraka.

Od srca zahvaljujem svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na razumijevanju i pruženoj potpori tijekom studiranja.

Marko Vlahov



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO VLAHOV**

Mat. Br.: **0035168274**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **OPTIMIZACIJA PARAMETARA LASERSKOG REZANJA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **OPTIMIZATION OF LASER CUTTING PARAMETERS**

Opis zadatka:

Na temelju literature opisati princip rada lasera, specificirati osnovne vrste lasera koji se upotrebljavaju u metaloprerađivačkoj industriji te navesti njihovu primjenu. Posebno analizirati vrste lasera koje se najščešće koriste za rezanje u proizvodnji metalnih konstrukcija te ih usporediti s stanovišta rezljivosti i ekonomičnosti s plazma i plinskim rezanjem. Definirati osnovne parametre rezanja plinskim CO₂ laserom te navesti neke primjere iz prakse s posebnim naglaskom na karakteristike i kvalitetu reza.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je načiniti adekvatan plan pokusa za određivanje optimalnih parametara rezanja CO₂ laserom na visokolegiranom nehrđajućem čeliku. Za sva stanja pokusa potrebno je provesti analizu kvalitete reza sukladno normi HRN EN ISO 9013. Ocijeniti prikladnost rezne površine za zavarivanje bez naknadne strojne obrade ili brušenja. Za optimalna stanja pokusa za koje su postignute najveće brzine provesti mikrostrukturno ispitivanje zone reza te utvrditi eventualne promjene mikrostrukture.

U konačnici je potrebno donijeti zaključke o daljnjim mogućnostima povećanja brzine i kvalitete reza uz naglasak na praktična ograničenja i moguće probleme.

Zadatak zadan:

19. rujna 2013.

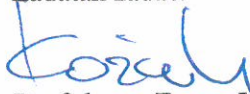
Rok predaje rada:

21. studenog 2013.

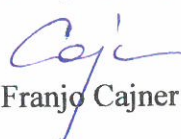
Predviđeni datum obrane:

27., 28. i 29. studenog 2013.

Zadatak zadao:


Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ:

POPIS SLIKA.....	I
POPIS TABLICA	III
POPIS OZNAKA.....	IV
POPIS KRATICA.....	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. CO ₂ LASERI.....	2
2.1. Difuzno hlađeni CO ₂ laseri.....	2
2.2. CO ₂ Slab laser	2
2.3. Zatvoreni CO ₂ laser	4
3. LASER S KRUTIM MEDIJEM (Nd:YAG)	5
3.1. Štapni laseri	5
3.2. Impulsni laseri (Lamp pumped Nd:YAG lasers)	6
4. DISK LASER.....	7
4.1. Izgled tankog diska.....	7
4.2. Princip rada lasera s tankim diskom.....	8
5. FIBER LASERI VISOKE SNAGE	10
6. LASERSKO REZANJE.....	13
6.1. Lasersko rezanje taljenjem	13
6.2. Lasersko rezanje kisikom	15
6.3. Lasersko rezanje isparavanjem.....	16
7. PARAMETRI POSTUPKA	17
7.1. Kontinuirani ili impulsni laser.....	17
7.2. Žarišna duljina.....	18

7.3.	Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada	18
7.4.	Brzina rezanja.....	19
7.5.	Plinovi za rezanje	20
8.	PODJELA I SVOJSTVA VISOKOLEGIRANI NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	21
8.1.	Austenitni nehrđajući čelici.....	22
8.2.	Feritni nehrđajući čelici.....	22
8.3.	Martenzitni nehrđajući čelici.....	24
8.4.	Dupleks nehrđajući čelici	24
9.	LASERSKO REZANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	25
9.1.	Lasersko rezanje nehrđajućih čelika inertnim plinom.....	25
9.2.	Lasersko rezanje nehrđajućih čelika kisikom.....	27
10.	USPOREDBA CIJENE I KVALITETE REZANJA LASERA S OSTALIM TEHNOLOGIJAMA.....	29
11.	NORMA HRN EN ISO 9013:2002 – TOPLINSKA REZANJA – KLASIFIKACIJA TOPLINSKIH REZANJA.....	34
11.1.	Područje primjene	34
11.2.	Izrazi i definicije objašnjeni slikama.....	34
11.3.	Tolerancije kuta ili okomitosti	36
11.4.	Visina profila.....	37
11.5.	Prosječna visina neravnina	37
11.6.	Dimenzionalne tolerancije.....	38
12.	EKSPERIMENTALNI DIO	41
12.1.	Oprema za CO ₂ lasersko rezanje	41
12.2.	Materijal	44
12.3.	Plan eksperimenta	45
13.	ANALIZA REZULTATA	48
13.1.	Hrapavost površine.....	48

13.2. Dimenzijska odstupanja	56
13.3. Širina zone utjecaja topline	59
14. ZAKLJUČAK	62
15. LITERATURA.....	63

POPIS SLIKA:

Slika 1.	Princip rada slab lasera	3
Slika 2.	Difuzno hlađeni CO ₂ laser, model TruCoax 2000.....	4
Slika 3.	Impulsni laser tvrtke Rofin StarPulse 500.....	6
Slika 4.	Konstrukcija tankog diska	7
Slika 5.	Princip rada lasera s tankim diskom	8
Slika 6.	Prikaz disk lasera TruDisk 8002.....	9
Slika 7.	Princip rada fiber lasera.....	10
Slika 8.	Prikaz fiber lasera IPG YLR – 1000.....	12
Slika 9.	Princip laserskog rezanja	13
Slika 10.	Postupak laserskog rezanja taljenjem	14
Slika 11.	Prikaz laserskog rezanja kisikom	15
Slika 12.	Postupak laserskog rezanja isparavanjem.....	16
Slika 13.	Usporedba reznih površina načinjenih kontinuiranim (a) i impulsnim (b) postupkom	17
Slika 14.	Žarišna udaljenost od površine	18
Slika 15.	Utjecaj žarišne udaljenosti na kvalitetu reza	19
Slika 16.	Shema zone reza laserskog rezanja nehrđajućih čelika	25
Slika 17.	Rez nehrđajućeg čelika izrezan laserskim rezanjem dušikom	26
Slika 18.	Usporedba maks. brzine rezanja kod različitih vrsta lasera, (AISI 304)	26
Slika 19.	Kemijske promjene u zoni rezanja nehrđajućeg čelika	27
Slika 20.	Rez na radnom komadu nehrđajućeg čelika kod laserskog rezanja kisikom .	28
Slika 21.	Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim izrazima.....	35
Slika 22.	Gotovi radni komad s odgovarajućim izrazima.....	35
Slika 23.	Tolerancija okomitosti ili kutnosti.....	36

Slika 24.	Tolerancije okomitosti ili kutnosti, radni komad do 30 mm	37
Slika 25.	Prosječna visina neravnina	37
Slika 26.	Tolerancije hrapavosti, radni komad do 30 mm	38
Slika 27.	Korisničko sučelje ByVision	42
Slika 28.	Sapnice korištene u eksperimentu a) NK1715 b) HK25 c) NK3020	43
Slika 29.	Uređaj za lasersko rezanje Bystar L 4025-65	43
Slika 30.	Uzorak za rezanje	45
Slika 31.	Mjerni uređaj Ferranti, Laboratorij za precizna mjerenja dužina, FSB.....	47
Slika 32.	Prikaz mikroskopa a) Leica DFC 295 b) Olympus GX51.....	47
Slika 33.	Prikaz pozicija za mjerenje	48
Slika 34.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2a) ..	50
Slika 35.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2b) ..	50
Slika 36.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2c) ..	50
Slika 37.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5a)	52
Slika 38.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5b).....	52
Slika 39.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5c)	52
Slika 40.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10a)	54
Slika 41.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10b).....	54
Slika 42.	Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10c)	54
Slika 43.	Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja za uzorke debljine 2,5 mm	56
Slika 44.	Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja uzoraka debljine 5 mm	57
Slika 45.	Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja uzoraka debljine 10 mm	58
Slika 46.	Uređaj za elektrolitsko nagrizanje	59
Slika 47.	Uzorci pod povećanjem od 12.5x	60
Slika 48.	Uzorci pod povećanjem od 100x	61

POPIS TABLICA:

Tablica 1.	Prikaz tehničkih karakteristika lasera TruCoax 2000	4
Tablica 2.	Prikaz tehničkih karakteristika lasera Rofin StarPulse 500	6
Tablica 3.	Prikaz tehničkih karakteristika lasera Trumpf TruDisk	9
Tablica 4.	Prikaz tehničkih karakteristika lasera IPG YLR-1000.....	12
Tablica 5.	Kemijski sastav materijala EN S355J0	30
Tablica 6.	Usporedba brzina rezanja pojedine tehnologije	31
Tablica 7.	Procjena troškova rezanja	32
Tablica 8.	Rasponi tolerancije okomitosti ili kutnosti, u	36
Tablica 9.	Rasponi tolerancije hrapavosti, $Rz5$	38
Tablica 10.	Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 1	39
Tablica 11.	Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 2	40
Tablica 12.	Dodatak za završnu obradu	40
Tablica 13.	Karakteristike stroja Bystar L 4025-65	41
Tablica 14.	Karakteristike laserskog izvora ByLaser 6000	42
Tablica 15.	Kemijski sastav nehrđajućeg čelika AISI 316	44
Tablica 16.	Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika AISI 316	44
Tablica 17.	Parametri rezanja	46
Tablica 18.	Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine.....	49
Tablica 19.	Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine.....	51
Tablica 20.	Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine.....	53
Tablica 21.	Dimenzijska odstupanja uzoraka od 2,5 mm	56
Tablica 22.	Dimenzijska odstupanja uzoraka od 5 mm	57
Tablica 23.	Dimenzijska odstupanja uzoraka od 10 mm	58

POPIS OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
λ	valna duljina svjetlosti	nm
K	faktor kvalitete zrake	
P	snaga lasera	W
v	brzina rezanja	m/min
f	žarišna duljina leće	mm
Δa	maksimalno odstupanje unutar klase tol.	mm
a	debljina radnog komada	mm
b	udaljenost sapnice od radnog komada	mm
e	duljina reza	mm
Z_t	visina profila	mm
l_n	duljina vrednovanja	mm
l_r	pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti	mm
f	promjer sapnice	mm
R_{z5}	prosječna visina neravnina	μm
R_a	aritmetički srednji iznos hrapavosti	μm
R_m	vlačna čvrstoća	MPa
$R_{p0,2}$	granica razvlačenja	MPa
A	produljenje	%
N_t	trošak opreme po satu	€/h
N_z	godišnji trošak opreme	€/god
t_{ABC}	broj radnih sati godišnje	

POPIS KRATICA

Kratika	Značenje
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Nd:YAG	Neodimij: Itrij – Aluminiј – Granat
Yb:YAG	Iterbij: Itrij – Aluminiј – Granat
CW	Continuous wave
ZUT	Zona utjecaja topline
ISO	International Standard Organization
AISI	American Iron and Steel Institute
AOD	Argon oxygen decarburization
PREN	Pitting resistance equivalent number

SAŽETAK

U uvodnom dijelu opisani su poznati postupci laserskog rezanja te njihove varijante, s naglaskom na prednosti i nedostatke pojedine tehnologije. Obradeni su parametri laserskog rezanja te njihov utjecaj na kvalitetu reza. Također, u uvodnom dijelu je objašnjena norma HRN EN ISO 9013 prema kojoj se određuje kvaliteta reza.

Eksperimentalni dio rezanja izveden je u tvrtki Dok-Ing d.o.o u Zagrebu, a analiza uzoraka je provedna u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje. S pomoću CO₂ lasera Bystar L 4025-65 rezani su radni komadi od visokolegiranog nehrđajućeg čelika kvalitete AISI 316. Promatran je utjecaj promjene brzine na kvalitetu reza, na radnim komadima debljina 2,5 mm, 5 mm i 10 mm koji su rezani različitim brzinama. Nakon rezanja, u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na FSB-u, izvršena su mjerenja hrapavosti i dimenzionalnog odstupanja te svrstavanje u pojedine tolerancijske klase prema normi HRN EN ISO 9013. Zatim je u Laboratoriju za zaštitu materijala provedeno ispitivanje mikrostrukture u zoni utjecaja topline. U Laboratoriju za metalografiju provedena je analiza promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline.

Analizom rezultata utvrđene su optimalne brzine rezanja na CO₂ laseru, za debljinu radnog komada 2,5 mm je 3,6 m/min, za debljinu radnog komada 5 mm je 1 m/min, a za debljinu radnog komada 10 mm je 0,5 m/min. S navedenim brzinama rezanja postignuta je hrapavost površine druge klase. Iz ovog se zaključuje da odabir odgovarajućih parametara uvelike ovisi je li težište na ekonomičnosti procesa ili na kvaliteti izrade.

Ključne riječi:

CO₂ laser, rezanje, nehrđajući čelici, optimizacija parametara

SUMMARY

Today, lasers are more often used in the industry as a cutting tool. This work reflects on most of the used laser cutting technologies and their variants. Through a detailed research, advantages and disadvantages were described along with the optimal parameters used for a cutting process that guarantees a quality cut according to the standard HRN EN ISO 9013:2002.

First part of the experimental work was conducted in the firm Dok-Ing d.o.o. in Zagreb, where the samples were cut using CO₂ laser Bystar L 4025-65. The second part of the experimental work, the analysis, was carried out in several Laboratories on the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. The samples material is stainless steel AISI 316. The influence of different cutting speed was observed on the quality of the cut, using samples with 2,5 mm, 5 mm and 10 mm thickness. The quality of the cut was analyzed at the Laboratory for precise measurement of length, measuring the roughness and dimensional tolerances. According to the measuring results, the samples were divided in tolerance grades referring to the standard HRN EN ISO 9013:2002. In the Laboratory for materials protection, the samples were prepared and analyzed on the microscope observing the width of the heat affected zone. The microstructure of the heat affected zone was analyzed in the Laboratory for materialography in order to establish possible microstructure changes.

The results indicate that the optimal cutting speed, used on a CO₂ laser, for different sample thickness is: 3,6 m/min for 2,5 mm thickness; 1 m/min for 5 mm thickness and 0,5 m/min for 10 mm thickness. With this cutting speed the roughness on all samples is given the second grade according to the standard HRN EN ISO 9013:2002. Those results indicate that the choice of the cutting parameters is a result of an economical or technological aspect.

Key words:

CO₂ laser, cutting, stainless steel, parameter optimization

1. UVOD

LASER je akronim od engleskih riječi „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, koji u prijevodu znači pojačavanje svjetlosti stimuliranom emisijom zračenja. Zapravo je laser svjetlosni oscilator, odnosno generator monokromatske, koherentne i usmjerene svjetlosti. Glavno svojstvo ovakve svjetlosti je mogućnost fokusiranja na točku malog promjera (< 1 mm), što je nemoguće kod prirodne svjetlosti. [1]

Laseri se razlikuju prema vrsti aktivnog materijala koji služi za pojačavanje svjetlosti. Za rezanje se upotrebljavaju CO₂ i Nd:YAG laseri, koji su dobili ime prema vrsti aktivnog materijala. Značajka svakog lasera je valna duljina emitirane svjetlosti (λ). Ona je funkcija razlike energetske stanja atoma / molekula aktivnog medija.

Laser s plinovitim medijem, CO₂ laser ima za aktivni materijal mješavinu plinova N₂, He, CO₂. CO₂ laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=10600$ nm) i snage je do 50 kW. Područja primjene industrijskog CO₂ lasera su rezanje i zavarivanje. [1]

Nd:YAG laser ima kruti aktivni medij koji je prema sastavu kristal granat, u ovom slučaju "Itrij-Aluminij-Granat", kod kojeg je približno 1% atoma itrija zamijenjeno atomima neodimija (Nd). Neodimij je aktivni materijal. Nd:YAG laser emitira infracrvenu svjetlost valne duljine ($\lambda=1064$ nm). Nd:YAG laser koristi se za označavanje, zavarivanje i rezanje elektroničkih komponenti. Primjenu pronalazi i u mikromehanici. Valne duljine oba lasera nalaze se u infracrvenom području, pa tako nisu vidljive golim okom. [1]

Industrijska proizvodnja bilježi porast primjene tehnologije rezanja laserom. Glavne prednosti ove tehnologije mogu se iskoristiti u gotovo svim granama industrije, od mikroelektronike do brodogradnje, poput:

- Visoke gustoće snage odnosno malog unosa topline;
- Uske zone utjecaja topline;
- Malih deformacija radnog komada;
- Velikih brzina rezanja;
- Visoke kvalitete reza;
- Visoke fleksibilnosti.

Glavni nedostatak tehnologije rezanja laserom, poput visokih investicijskih troškova, može se nadoknaditi velikom brzinom rezanja i nepotrebnom naknadnom obradom radnog komada te vrlo visokom kvalitetom reza. [1]

2. CO₂ LASERI

CO₂ laseri emitiraju svjetlost valne duljine 10,6 μm te imaju ukupnu efikasnost od otprilike 10 do 13%. Za stvaranje laserske zrake CO₂ laseri koriste mješavinu plinova. Mješavina tih plinova se sastoji od helija, dušika, CO₂ i drugih dodataka (aditiva).

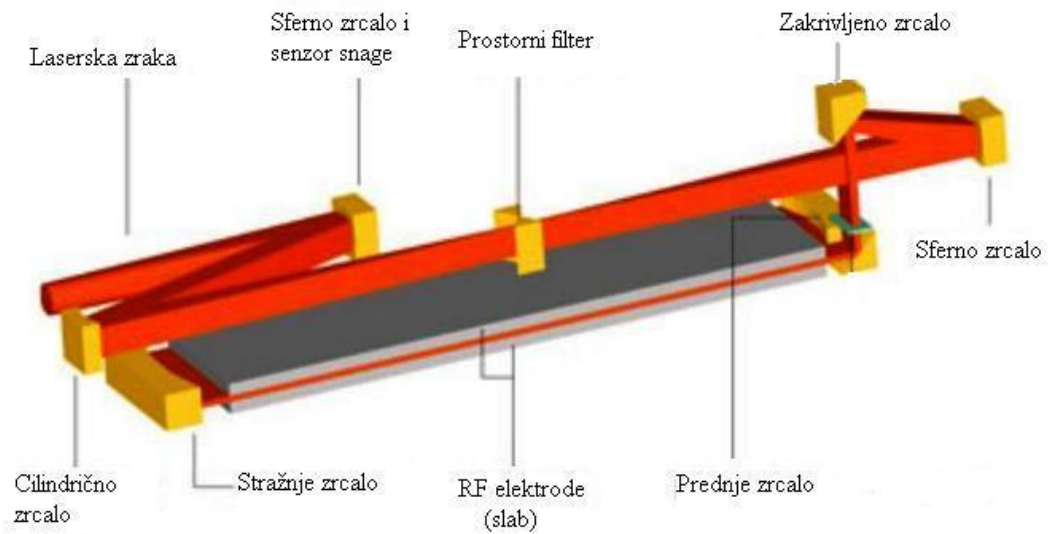
Aktivni medij lasera, plin CO₂ je stimuliran električnim pražnjenjem. Tijekom tog procesa, molekule dušika predaju energiju, od sudara elektrona, molekulama CO₂. Prijelaz iz višeg energetskog nivoa, pobuđenih CO₂ molekula, u niži energetski nivo se postiže otpuštanjem fotona, što u konačnici dovodi do stvaranja laserske zrake. Sudaranjem molekula CO₂ s atomima helija, koji čine većinski dio plinske smjese, molekule CO₂ se vraćaju u svoje početno energetsko stanje i spremne su za ponovni ciklus. Da bi se ti procesi mogli odvijati potreban je tlak 100 – 250 hPa. Višak energije koji ne može biti upotrijebljen za stvaranje laserske zrake se pretvara u toplinu koja se odvodi iz sustava. [2]

2.1. Difuzno hlađeni CO₂ laseri

Učinkovitost lasera je vrlo niska. Količina unesene energije potrebne za rad lasera je vrlo velika od koje se samo mali dio iskoristi za lasersku zraku (10-15%) dok se preostali dio gubi na toplinu. Iz tog razloga je važno hlađenje. Kod prvih CO₂ lasera, mješavina laserskog plina, zapečaćena unutar cijevi za pražnjenje, bila je hlađena isključivo kondukcijom topline. Unatoč učinkovitom hlađenju vanjskog zida cijevi od kvarcnog stakla, zraka je mogla postići snagu od oko 50 W po metru cijevi. Drugim riječima, ovaj koncept nije dopustio konstrukciju lasera velike snage. [2]

2.2. CO₂ Slab laser

CO₂ Slab laseri imaju vrlo kompaktan dizajn, čak i u usporedbi s laserima brzog toka (fast flow laser). Ovi laseri su dostupni u rasponu snage između 1 i 6 kW, a opremljeni su bakrenim elektrodama velikih površina. Između elektroda odvija se frekvencijom pobuđeno plinsko pražnjenje. Uski razmak među elektrodama omogućuje učinkovito uklanjanje topline iz tlačne komore, čime se postiže povećanje snage lasera. Prijenos topline postiže se difuzijom grijanih molekula na hlađene ploče elektroda. Nestabilni rezonator sastoji se od rotirajućih paraboličnih zrcala, čime je omogućeno odvajanje fotona od laserske zrake. Vodom hlađene komponente koriste se kako bi se izvorna pravokutna zraka pretvorila u okruglu simetričnu zraku s kvalitetom od $K \geq 0,9$. [2]



Slika 1. Princip rada slab lasera [3]

Male dimenzije laserske glave pojednostavljaju integraciju lasera u strojevima za obradu i omogućuju dizajniranje sustava kod kojih se laserska glava može mijenjati. Za velike radne površine, kao u brodogradnji, kvalitetna laserska zraka može biti ostvarena preko cijelog radnog područja. To je posebno važno kod korištenja takvih lasera za rezanje. [2]

Prednosti takvih lasera mogu se sažeti u nekoliko točaka, [2]:

- Vrlo kompaktna konstrukcija;
- Visoka kvaliteta zrake (snopa);
- Nepotrebno hlađenje plina;
- Odlična toplinska stabilnost;
- Niska potrošnja plina;
- Nema protoka plina i stoga nema kontaminacije optike rezonatora;
- Jednostavno održavanje.



Slika 2. Difuzno hlađeni CO₂ laser, model TruCoax 2000 [4]

Tablica 1. Prikaz tehničkih karakteristika lasera TruCoax 2000 [5]

Proizvodač	Trumpf
Model	TruCoax 2000
Snaga	2000 W
Stabilnost	+/- 2%
Raspon temperature vode za hlađenje	5° - 21°C
Faktor kvalitete zrake K	0.9
Potrošnja plina	1.7 l/god

2.3. Zatvoreni CO₂ laser

Zatvoreni CO₂ laseri („*Sealed off Laser*“) rade na sličnom principu kao i slab laseri. Takvi laseri su potpuno zatvoreni i ne zahtijevaju dovod vanjskog plina; što ih čini robusnima i vrlo pouzdanima. Ovi laseri su dostupni s izlaznom snagom od 600 W i obično se koriste kod rezanja nemetala (papir, staklo, plastika), metala, izrade prototipova i graviranja. [2]

3. LASER S KRUTIM MEDIJEM (Nd:YAG)

Dok se aktivni medij u plinskim laserima sastoji od atoma, iona i molekula u plinovitom stanju (CO₂ laser), laseri s krutim medijem koriste aktivni medij u obliku kristala. Atomi u takvoj jezgri su gušći, te time manje pokretljivi nego u plinovitom stanju. Ittrij-aluminj-granat (YAG) kristal ima važnu ulogu u strojnoj obradi. Ioni neodimij (Nd-3+) ili iterbij (Yb3-) mogu biti umetnuti u međuprostore u kristalnoj strukturi. Ti ioni predstavljaju aktivni medij. Kombinacijom odgovarajućeg iona s kristalnom rešetkom dobiva se Nd:YAG laser ili Yb:YAG laser.

Postoje i drugi laserski aktivni kristali kao vanadati koji imaju puno manji učinak na obradu. Većina lasera koristi neodimij kao aktivnu tvar. U budućnosti se očekuje da će iterbij dobiti veći značaj u industrijskoj obradi osobito uzimajući u obzir uvođenje „disc lasera“. Laseri čvrstog stanja emitiraju svjetlost valnih duljina 1064 nm odnosno 1030 nm koje su blizu infracrvenog spektra. Prednost lasera čvrstog stanja su izrazito fleksibilna optička vlakna koja se koriste za dovođenje laserske zrake do predmeta obrade. Mnoge materijale, osobito metale, karakterizira povećana apsorpcija valnih duljina blizu infracrvenog spektra, najmanje 10,6 μm. Različite tehnologije i oblici se upotrebljavaju za stvaranje laserske zrake s krutom tvari. [1]

3.1. Štapni laseri

Najstariji i najčešće korišteni tip lasera s krutim medijem je Nd: YAG laser. Nazivaju se još i štapni laseri budući da je aktivna tvar kristal okruglog štapnog oblika. Promjer kristala je 2 do 8 mm i duljine 20 do 200 mm. Takvi laserski kristali mogu dosegnuti izlaznu snagu između 1 i 1000 W. Završetak tog materijala je uvijek visoko poliran monokristal koji osigurava optimalna optička svojstva. [2]

3.2. Impulsni laseri (Lamp pumped Nd:YAG lasers)

U slučaju impulsnih lasera, optički podražaj (pobuda) postiže se svjetlosnim impulsom iz bljeskalice kojim se pobuđuje aktivna sredina lasera čvrstog stanja. U industriji se najčešće koriste impulsni Nd : YAG laseri s prosječnom snagom zrake manjom od 100 W. Takvi laseri mogu raditi s izlaznom snagom od oko 500 W i s najvišom impulsnom snage većom od 20 kW . To ih čini pogodnima za rezanje debelih materijala ili visoko reflektirajućih materijala . [2]



Slika 3. Impulsni laser tvrtke Rofin StarPulse 500 [6]

Tablica 2. Prikaz tehničkih karakteristika lasera Rofin StarPulse 500 [6]

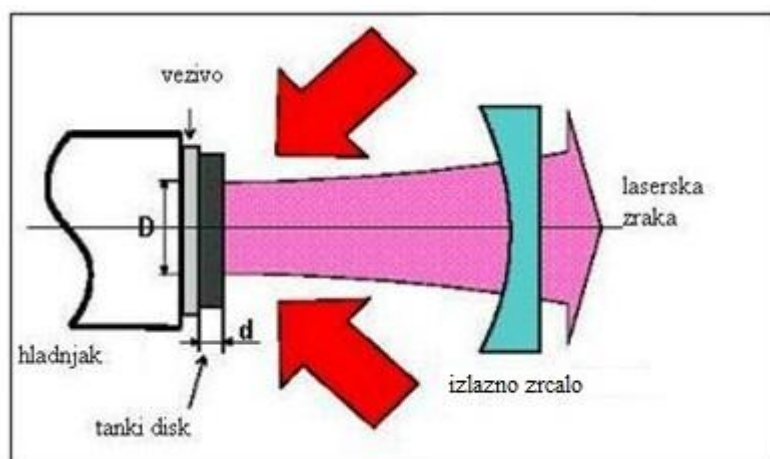
Tip lasera	Impulsni Nd:Yag
Izlazna snaga	500 W
Max. izlazna snaga	20 kW
Max. energija impulsa	120 J
Širina impulsa	0.3-0.5 ms
Frekvencija impulsa	500 Hz
Promjer optičkog vlakna	400-600 μm
Valna duljina	1064 nm

4. DISK LASER

Koncept tankog laserskog diska je vrsta laserske tehnologije za lasere čvrstog stanja koji za pobudu koriste diode. Taj koncept omogućuje izradu lasera visoke izlazne snage, uz vrlo dobru učinkovitost. Optička izobličenja laserske zrake su zanemariva zbog površinskog hlađenja diska i stoga je rad na laseru tankog diska moguć pri ekstremno velikoj izlaznoj snazi. [7]

4.1. Izgled tankog diska

Princip rada lasera s tankim diskom je prikazan na slici 4. Laserski kristal je oblikovan kao disk s promjerom od nekoliko mm - ovisno o izlaznoj snazi / energiji i debljini od 100 do 200 μm . Dimenzija diska, ovisi o laserskom aktivnom materijalu, količini doziranja i dizajnu pumpe. Materijal tankog diska je itrij - aluminij - granat (YAG) i središnji aktivni dio diska može biti doziran s iterbijevim ionima. [7]



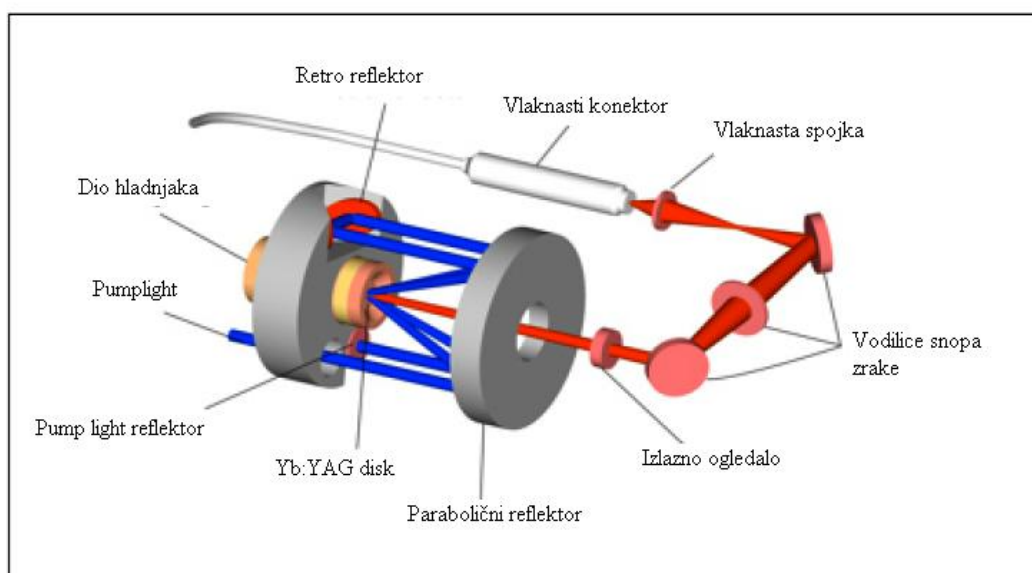
Slika 4. Konstrukcija tankog diska [7]

Povećanje rasipavanja topline u disku varira ovisno o debljini diska pa mora biti korišten najtanji mogući disk koji je u skladu s geometrijom pumpe kako bi se povećao izlazni intenzitet. U kombinaciji s geometrijom pumpe koja omogućava višestruke prolaze svjetlosti osigurava se učinkovita apsorpcija snage pumpe. Iz tog razloga, dozirani iterbij - YAG (Yb : YAG), koji emitira laserske zrake s valnom duljinom od 1070 nm, trenutno je preferirani materijal za izradu diska zbog mogućnosti visoke apsorpcije (od 940 nm) svjetlosti. Yb : YAG diskovi mogu biti mnogo tanji od Nd : YAG diskova.

Stražnja strana diska je obložena visoko reflektivnim slojem i djeluje kao zrcalo u rezonatoru; prednja strana je obložena s antirefektivnim slojem za obje valne duljine. Disk je montiran tako da je stražnjom stranom okrenut na rashladni uređaj, koristeći spoj zlato - kositar kao vezivo, što omogućuje vrlo jako pričvršćivanje diska na rashladnom uređaju bez ikakve deformacije. [7]

4.2. Princip rada lasera s tankim diskom

U načelu, tanki disk je optički podražen velikom snagom diodnih modula na prednjoj površini. Parabolično zrcalo reflektira svjetlost (valne duljine 940 nm) emitiranu od laserske diode na aktivni Yb:YAG kristal lasera tankog diska. Svjetlost koja je reflektirana od stražnje strane diska, zatim udara u parabolično zrcalo po drugi puta, skreće na retro reflektor i vraća se na parabolično zrcalo od kojeg se odbija u disk. Proces se nastavlja sve dok se nakon 16 prolaza svjetlost potpuno apsorbira i emitira laserska zraka visoke kvalitete s valnom duljinom od 1070 nm, kao što je prikazano na slici 5. Reflektivni sloj na stražnjoj strani diska i odvajajuće zrcalo, koje se nalazi ispred paraboličnog reflektora sačinjavaju rezonator. Emitirana zraka visoke kvalitete vodi se optičkim kablom promjera od 150 μm ili 300 μm dužine do 100 m. [7]



Slika 5. Princip rada lasera s tankim diskom [7]

Disk laseri su idealni za zavarivanje i rezanje metala gdje je potrebna visoka kvaliteta i velika snaga laserskog uređaja i laserske zrake, pa se najčešće koriste u automobilskoj industriji i zrakoplovnoj industriji.



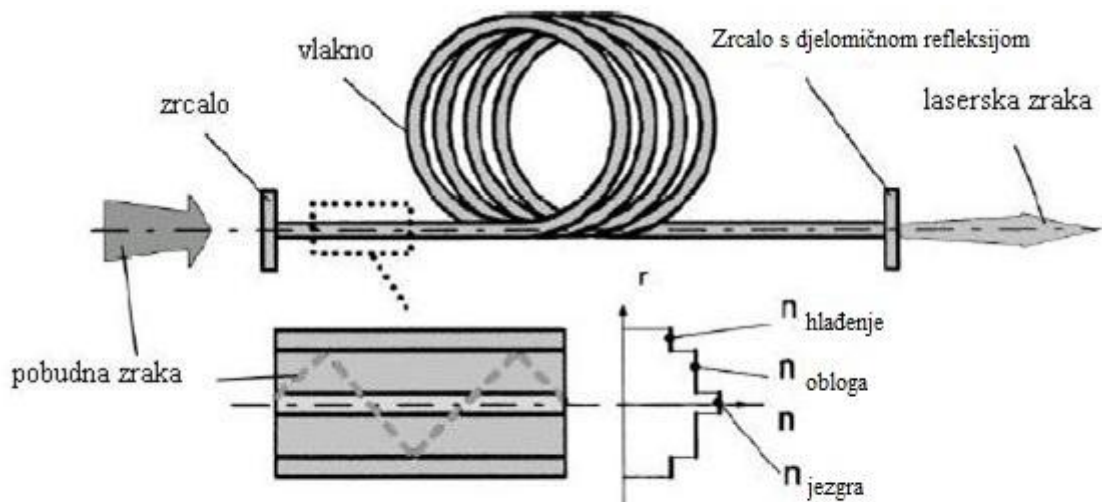
Slika 6. Prikaz disk lasera TruDisk 8002 [8]

Tablica 3. Prikaz tehničkih karakteristika lasera Trumpf TruDisk. [8]

Tehnički podaci	TruDisk 8002	TruDisk 16002/16003
Valna duljina	1030 nm	1030 nm
Snaga lasera	8000 W	16000 W
Kvaliteta zrake	8 mm* mrad	8/12 mm * mrad
Min. promjer optičkog kabla	200 μm	200/300 μm
Stabilnost snage	/-1%	/-1%
Temp. tekućine za hlađenje	5-20 °C	5-20 °C

5. FIBER LASERI VISOKE SNAGE

Fiber laseri velike snage sastoje se od aktivnih optičkih vlakana i poluvodičkih diode. Oni su spoj između dvije inovativne i najnaprednije laserske tehnologije. Fiber laseri koriste jednostruko emitirajuće (*“Single emitter”*) poluvodičke diode kao izvor svjetlosti za stvaranje aktivnih vlakana. Emitirana laserska zraka je sadržana u optičkim vlaknima i putuje kroz izoliran fleksibilan kabel. Aktivna vlakna su specijalna optička vlakna obogaćena rijetkim zemljanim ionima što im omogućava stvaranje ekstremno britke svjetlosti iz vrlo male jezgre. Na taj način stvara se velika izlazna snaga (u kW) s vrhunskom kvalitetom zrake. [7]



Slika 7. Princip rada fiber lasera. [7]

Kombinacijom tehnologija postiže se jedinstveni i najnapredniji laserski sistem čiji parametri nadmašuju sve tradicionalne laserske tehnologije uključujući disk laser, rod (štapni laser), Nd:YAG i CO₂ lasere. Fiber laseri odlikuju se kompaktnom veličinom, dugovječnim radom diode, jednostavnim održavanjem, velikim iskorištenjem električne energije i kvalitetnom laserskom zrakom bez obzira o kojim se snagama lasera radilo. Fiber laseri dostupni su u rasponu 500 W do 50 kW s iskorištenjem energije većim od 30 %. Radni raspon lasera je od 10 % do pune snage bez promjene kvalitete laserske zrake. Time se omogućuje korištenje lasera za precizno rezanje što je prije bilo nezamislivo.

Fiber laseri imaju monolitičko, potpuno kruto stanje, „vlakno do vlakna“ oblik koji ne koristi zrcala ili optiku za poravnanje i namještanje. To pojednostavljuje integraciju optičkih lasera u proizvodnji medicinskih i drugih laserskih sistema. Fiber laseri su tipično manji i lakši od tradicionalnih lasera te time zauzimaju manje radnog prostora. Dok konvencionalni laseri mogu biti osjetljivi zbog preciznog poravnanja zrcala, fiber laseri su čvršći te manje osjetljivi na radnu okolinu i uvjete u kojima se koriste. [7]

Glavne prednosti fiber lasera su [7]:

- Učinkovitost veća od 30% kod rada bez prekida;
- Jednostavno održavanje;
- Modularni ‘plug & play’ dizajn;
- Kompaktan, čvrst, i jednostavan za instalaciju;
- Procjena životnog vijeka diode $> 100,000$ h;
- Integrirani prekidač snopa.



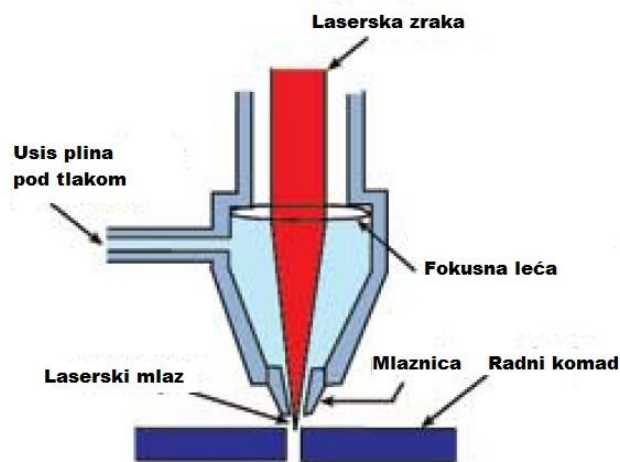
Slika 8. Prikaz fiber lasera IPG YLR – 1000 [9]

Tablica 4. Prikaz tehničkih karakteristika lasera IPG YLR-1000. [9]

Proizvod	YLR-1000
Opis	Fiber laserski sistem
Način rada	CW (kontinuirani)
Izlazna snaga	1000 W
Debljina promjera vlakna	50, 100, 200 , 300 μm , ovisno o izlaznoj snazi
Energetska učinkovitost pretvorbe energije	$\geq 30 \%$

6. LASERSKO REZANJE

Lasersko rezanje je toplinski proces, u kojem je zarez formiran zagrijavanjem, fokusiranom laserskom zraku gustoće snage oko 10^4 Wmm^{-2} , u kombinaciji sa strujanjem aktivnog ili inertnog plina. Fokusirana laserska zraka tali materijal, a mlaz plina pod tlakom otpuhuje rastaljeni materijal od zarez. Osnovni princip laserskog rezanja je prikazan slikom 9. [10, 11, 12, 14]

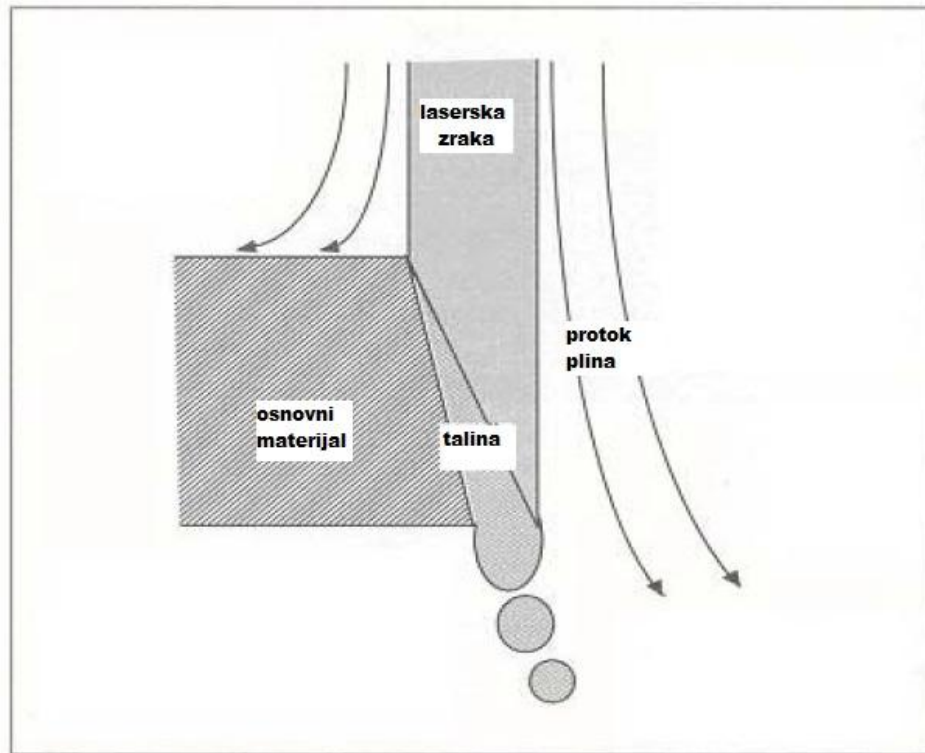


Slika 9. Princip laserskog rezanja [13]

Lasersko rezanje se može podijeliti po mehanizmu rezanja na: lasersko rezanje taljenjem (rezanje inertnim plinom), lasersko rezanje kisikom i lasersko rezanje isparavanjem. [10, 11]

6.1. Lasersko rezanje taljenjem

Postupak laserskog rezanja taljenjem se bazira na taljenju materijala u zarezu, laserskom zrakom, i ispuhivanju mlazom inertnog plina pod visokim tlakom. Laserska zraka je jedini izvor topline u procesu dok je mlaz inertnog plina samo otpuhuje talinu iz reza. Inertni plin (uglavnom dušik i/ili argon) također štiti talinu reza od vanjskih nečistoća te štiti lasersku sapnicu. Slika 10. prikazuje postupak laserskog rezanja taljenjem. [10, 11, 12, 14]

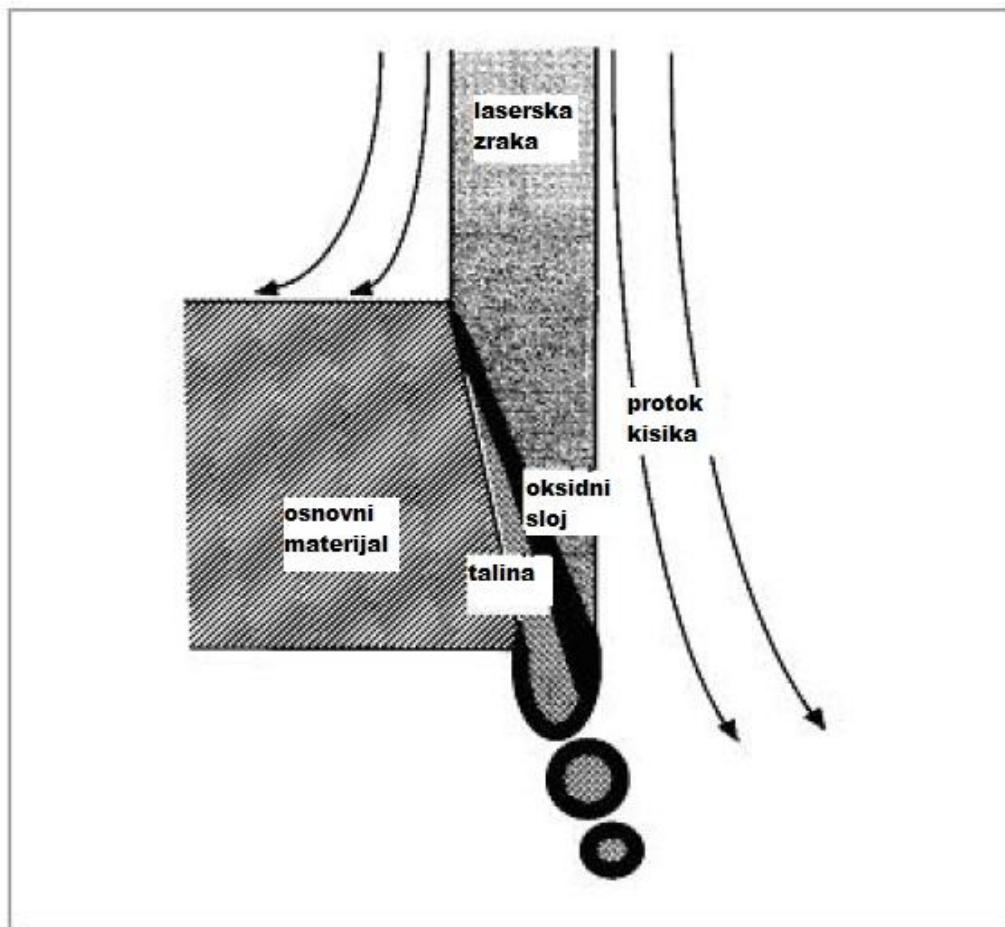


Slika 10. Postupak laserskog rezanja taljenjem [10]

Lasersko rezanje taljenjem je primjenjivo kod svih metala posebno kod nehrđajućih čelika i drugih visokolegiranih čelika, aluminijevskih i titan legura. Kvaliteta reza je velika, ali su brzine rezanja relativno male u usporedbi s postupcima rezanja s aktivnim plinom. Prednost ovog postupka je da rez nema oksida te ima istu otpornost na koroziju kao i osnovni materijal. Pozicije rezanja se mogu zavarivati bez naknadne obrade. Glavna tehnološka poteškoća je izbjeći srh na rubovima reza, što se rješava visokim tlakom inertnog plina; iznad 10 bara. [10, 11, 12, 14]

6.2. Lasersko rezanje kisikom

Kod laserskog rezanja kisikom fokusirana laserska zraka zagrijava materijal u oksidnoj atmosferi te potiče egzotermnu oksidaciju materijala. Egzotermna oksidacija pomaže pri laserskom rezanju omogućujući dodatni unos topline što rezultira većim brzinama rezanja u usporedbi s rezanjem inertnim plinom. Laserska zraka uspostavlja i stabilizira izgaranje u rezu, dok pomoćni plin otpuhuje rastaljeni materijal iz zone rezanja te štiti optiku lasera. Slika 11. prikazuje lasersko rezanje kisikom. [10, 11, 12, 14]

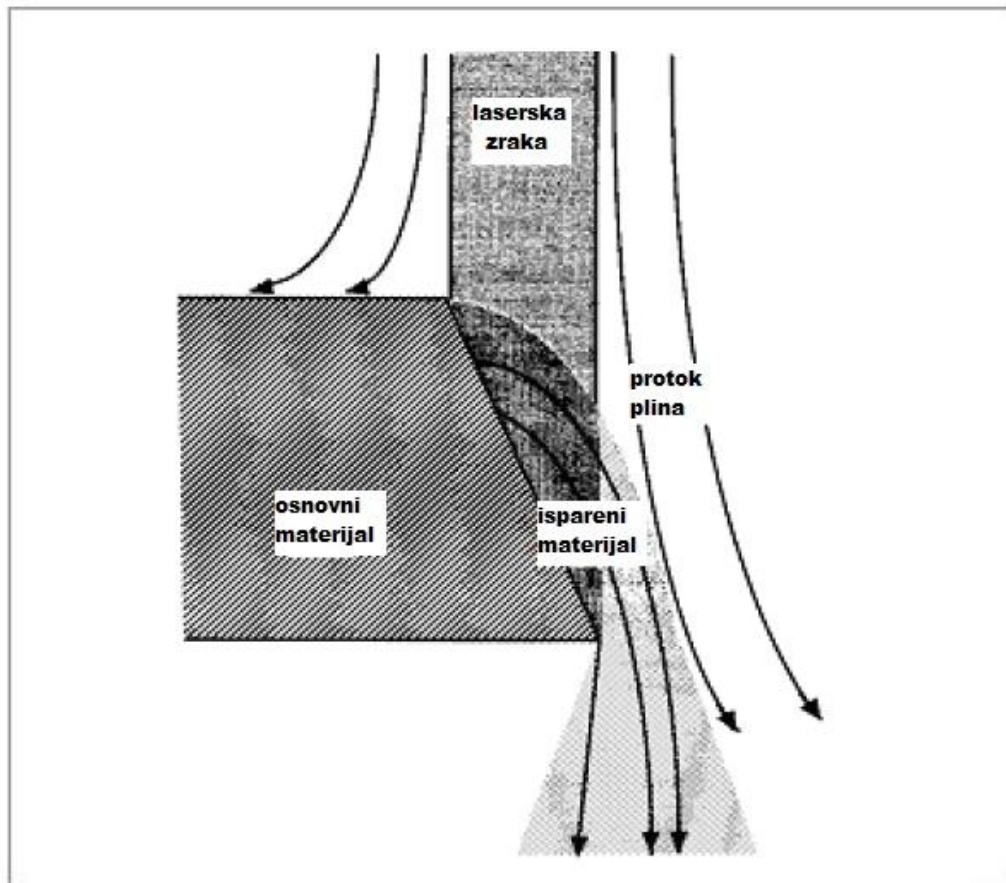


Slika 11. Prikaz laserskog rezanja kisikom [10]

Lasersko rezanje kisikom je primjenjivo za nelegirane i niskolegirane čelike. Formiranjem oksidnog sloja u zoni reza smanjuje se viskoznost i površinska napetost taline što pojednostavljuje ispuhivanje taline. [10]

6.3. Lasersko rezanje isparavanjem

Za vrijeme laserskog rezanja isparavanjem materijal se grije iznad temperature taljenja te u konačnici isparava. Mlaz plina služi za ispuhivanje isparenog materijala iz zone rezanja da se izbjegne kondenzacija materijala u formiranom rezu. Slika 12. prikazuje princip rada laserskog rezanja isparavanjem. [10, 11]



Slika 12. Postupak laserskog rezanja isparavanjem [10]

Tipični materijali koji se režu isparavanjem su akrili, polimeri, drvo, papir, koža i neke keramike. Ovaj postupak ima velike zahtjeve na snagu koje ovise o termičkim svojstvima materijala koji se reže. Visoka gustoća zrake se postiže pravilnim podešavanjem laserske radijacije i žarišta. Za rezanje metala, lasersko rezanje isparavanjem je najsporija metoda između spomenutih, međutim prikladna je za precizne i komplicirane izratke. [10, 14]

7. PARAMETRI POSTUPKA

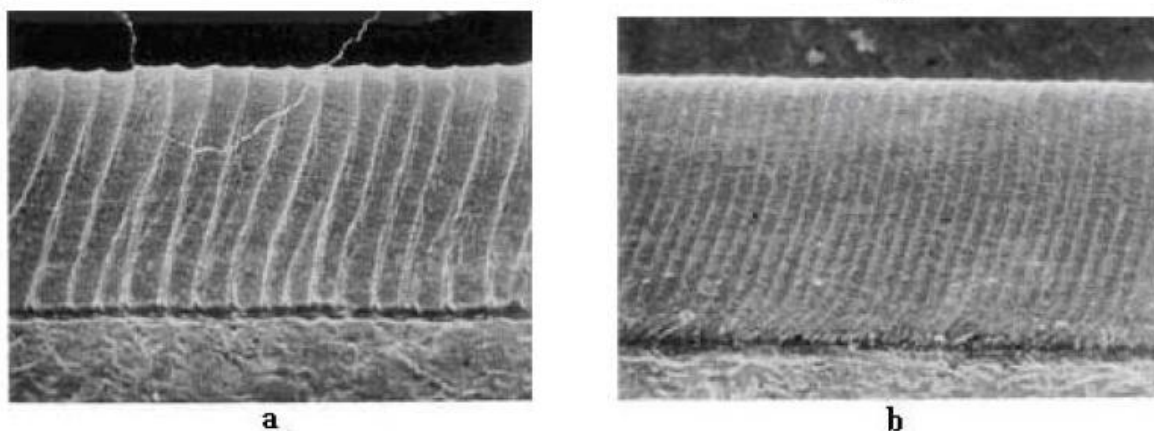
Parametri procesa uključuju ona svojstva postupka laserskog rezanja koje se mogu mijenjati da bi se poboljšala kvaliteta rezanja i da se dobiju tražena svojstva reza. Varijabilni parametri prilikom laserskog rezanja su kontinuirani ili impulsni režim rada, žarišna duljina, položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada, brzina rezanja, plinovi za rezanje. Međutim, iako su navedeni parametri promjenjivi, većina ih je upravljana automatikom stroja u ovisnosti o parametrima koje operater ima mogućnost mijenjati.

7.1. Kontinuirani ili impulsni laser

Visoki intenzitet rezanja moguće je postići s impulsnom i kontinuiranom zrakom. Vršna snaga u impulsnom rezanju ili prosječna snaga u kontinuiranom načinu rada određuju penetraciju. Laserska zraka kao kontinuirani val (*cw – continuous wave*) visoke snage preferira se kod glatkih, debljih sekcija jer se mogu postići veće brzine rezanja s većom prosječnom snagom. Međutim, ispuhivanje taline ili isparenog materijala nije dovoljno učinkovito što se odražava na kvalitetu reza.

Impulsne zrake niže energije primjenjuju se za precizna rezanja finih komponenti. Visoka vršna snaga u kratkim intervalima omogućuje potrebno zagrijavanje, dok niža prosječna snaga omogućuje sporije odvijanje procesa, te efektivnije ispuhivanje rastaljenog/isparenog materijala uz ostvarivanje bolje kvalitete reza. [14]

Usporedba rezova kontinuiranim i pulsničkim postupkom je prikazana na slici 13.



Slika 13. Usporedba reznih površina načinjenih kontinuiranim (a) i impulsnim (b) postupkom [12]

7.2. Žarišna duljina

Laseri krutog stanja koriste optička vlakna za prijenos zrake dok se kolimator koristi za formiranje odvojene laserske zrake koja se emitira iz svjetlosnog kabela u paralelnu zraku. Kad laserska zraka prođe svjetlosni kabel i kolimator, žarišna leća fokusira paralelnu lasersku zraku na radni komad. CO₂ laseri ne koriste optička vlakna za prijenos zrake, stoga se zraka emitirana iz lasera direktno fokusira na radni komad pomoću žarišnih leća.

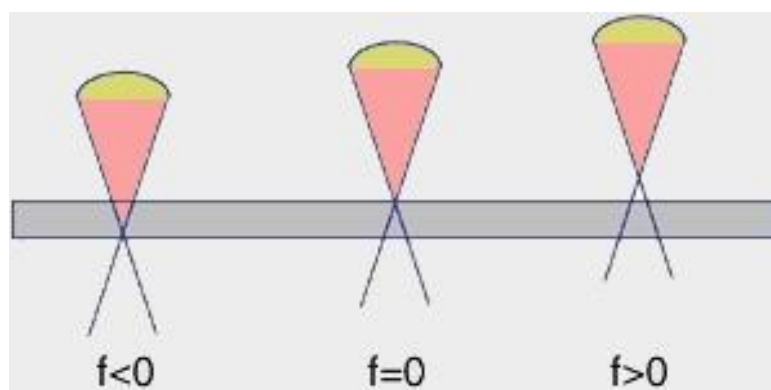
Postupak rezanja laserom zahtjeva fokusiranje laserske zrake velike snage na malu površinu da bi se ostvarila visoka gustoća snage što omogućuje rezanje materijala. Žarišna duljina definira površinu žarišne točke te dubinu žarišta što je jednako udaljenosti s koje se može provesti rezanje. [14]

7.3. Položaj žarišta u odnosu na površinu radnog komada

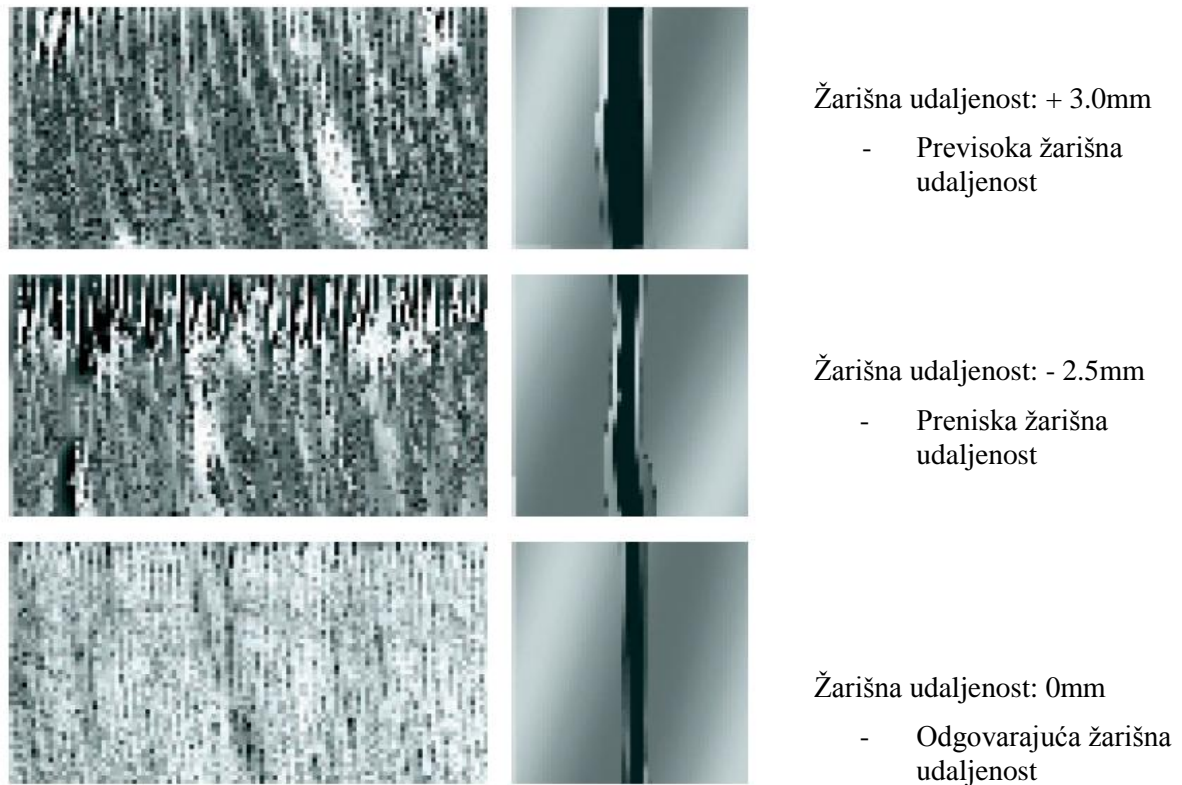
Žarišna udaljenost služi za određivanje pozicije žarišta u materijalu što bitno utječe na kvalitetu rezanja. Žarišna udaljenost mora biti kontrolirana da se osiguraju optimalne performanse rezanja. Razlike u materijalu također mogu utjecati na promjenu žarišta i varijacije u obliku laserske zrake.

Optimalni položaj žarišta kod rezanja s inertnim plinom je kod donje površine materijala, jer se ostvaruje širi rez što olakšava ispuhivanje taline iz zone rezanja.

Ako je položaj žarišta pozicioniran previsoko od površine izratka ili previše ispod površine, gustoća zrake padne ispod razine pri kojoj nije moguće rezanje kao što je prikazano na slikama 14 i 15. [14]



Slika 14. Žarišna udaljenost od površine



Slika 15. Utjecaj žarišne udaljenosti na kvalitetu reza [15]

7.4. Brzina rezanja

Energija korištena za lasersko rezanje se dijeli na dva dijela, energiju potrebnu da se napravi rez i gubici energije u zoni rezanja. Energija korištena za vrijeme rezanja je neovisna o vremenu rezanja, ali energija koja se gubi u zoni rezanja je proporcionalana vremenu potrebnom da se ostvari rez. Stoga, gubitak energije u zoni rezanja se smanjuje povećanjem brzine rezanja što direktno utječe na iskoristivost procesa. Razina gubitaka kondukcijom, koji je najznačajniji gubitak u zoni rezanja za većinu metala, strahovito raste povećanjem debljine materijala i snižavanjem brzine rezanja.

Brzine rezanja moraju biti usklađene s protokom plina i snagom. Porastom brzine rezanja raste pojava crta na rubu reza dok je s druge strane penetracija jako smanjena. Kod korištenja kisika, niske brzine rezanja rezultiraju povećanim gorenjem na rubovima reza što umanjuje kvalitetu reza te povećava zonu utjecaja topline.

Općenito, brzina rezanja je obrnuto proporcionalna debljini materijala. Brzina mora biti reducirana kada se režu oštri kutovi sa smanjenjem snage da se izbjegnu izgaranja. [14]

7.5. Plinovi za rezanje

Plinovi za rezanje imaju pet funkcija za vrijeme rezanja. Inertni plin, dušik, ispuhuje rastaljeni materijal nedopuštajući kapljicama da otvrdnu s donje strane reza (srh), dok aktivni plin, poput kisika, sudjeluje u egzotermnoj reakciji s materijalom. Plin također sprječava da se formira plazma kad se režu deblje sekcije s jakim intenzitetom, te protokom štiti žarišnu optiku od štrcanja. Rub reza se hladi protokom plina što smanjuje ZUT. [14]

Izbor plina ima značajan utjecaj na produktivnost i kvalitetu procesa rezanja laserom. Najčešće korišteni plinovi su kisik (aktivni plin) i dušik (inertni plin). Iako dušik nije potpuno inertni plin, najviše se koristi za inertna rezanja jer je relativno jeftin. Potpuno inertni plinovi, poput argona i helija, su uobičajeni izbor kod rezanja titana jer sprječavaju formiranje oksida i titanovih nitrida. [11,14]

Dušik se preferira kod rezanja nehrđajućih čelika, visokolegiranih čelika, aluminijskih i nikla, te mu je potreban veći tlak da može ispuhati rastaljeni materijal iz reza. Kada se koristi dušik, pod visokim tlakom, za rezanje nehrđajućeg čelika dobije se kvalitetan rez bez oksida. Glavni problem kod rezanja s inertnim plinom je formiranje srha s donje strane reza. Pravilnim odabirom parametara rezanja se može izbjeći ova pojava. Tlak dušika se kreće od 10 – 20 bar te se tlak povećava s povećanjem debljine materijala. Čistoća dušika treba biti iznad 99.8%. [10,11,14]

Kisik se koristi za rezanje mekih i niskolegiranih čelika. Korištenjem kisika se postiže egzotermna reakcija, koja doprinosi unosu topline što rezultira većim brzinama rezanja. Tlak kisika za rezanje iznosi 0,5 – 5 bara. Povećanjem debljine materijala potreban je veći tlak kisika da se izbjegne gorenje. Produktivnost rezanja raste korištenjem kisika velike čistoće (99.9%). [10, 11, 12, 14]

8. PODJELA I SVOJSTVA VISOKOLEGIRANI NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Razvoj i primjena visokolegiranih nehrđajućih čelika započinje početkom 20. stoljeća. Patentirao ih je 1912. poznati proizvođač čelika Krupp. Industrijska proizvodnja tih materijala i njihova primjena počinje već 1914. godine. [21]

Istodobno, u razdoblju od 1910. do 1915. godine, navodi se da je Harry Bready iz Sheaffielda u Engleskoj proizvodio prvi pribor za jelo od visokolegiranog čelika. [21]

Iz tog razdoblja pa sve do danas, ti su se materijali intenzivno razvijali, ovisno o potrebama primjene, naročito u petrokemijskoj industriji. Podjela visokolegiranih nehrđajućih čelika je raznolika i neujednačena. Koriste se podjele materijala prema strukturi, gdje su glavne grupe [22]:

- Feritni čelici;
- Martenzitni čelici;
- Austenitni čelici;
- Feritno austenitni tj. dupleks čelici.

Detaljna podjela čelika, s obzirom na njihovu strukturu [22]:

- Feritni Cr-čelici;
- Martenzini Cr-čelici;
- Mekani martenzitni Cr-Ni čelici;
- Feritno-austenitni (dupleks) Cr-Ni-Mo-N čelici;
- Austenitni Cr-Ni(Mo)-čelici s udjelom ferita do 15%;
- Austenitni Cr-Ni(Mo)-čelici bez ferita ili visokoaustenitizirani čelici.

8.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni čelici su zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre mogućnosti obrade, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava, te estetskih karakteristika najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije i građevinarstvu za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. [23]

Austenitni nehrđajući čelik korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada je AISI 316 (W.Nr 1.4401). To je legura na osnovi željeza koja sadrži nominalno 18% kroma i 11% nikla, uključujući manje količine ugljika, dušika, mangana i silicija. Od osnovnog 18-8 austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, a baziraju se na dodavanju npr. molibdena i dušika zbog bolje otpornosti na koroziju. Austenitni čelici posjeduju visoku istezljivost i žilavost, a ta svojstva ovi čelici zadržavaju i pri sniženim temperaturama.

Austenitni korozijski postojani čelici smatraju se lakše zavarljivim od ostalih skupina korozijski postojanih Cr-Ni čelika iz razloga što kod njih ne nastupaju velike fazne (metalurške) transformacije. Zbog toga je moguće postići zavarene spojeve sa svojstvima sličnima osnovnom materijalu i bez prethodnog zagrijavanja ili naknadne toplinske obrade.[23]

8.2. Feritni nehrđajući čelici

Legure iz ove skupine sadrže uobičajeno 11-17% Cr te sa sadržajem ugljika manjim od 0,1% imaju feritnu strukturu na sobnoj temperaturi. Često im se još dodaje Mo za povećanje korozijske otpornosti, a Ti ili Nb za postizanje bolje zavarljivosti. Postotak kroma može biti čak do 30%.

Također se koriste u rafinerijskim postrojenjima, te postrojenjima za proizvodnju deterdženata, a od tih čelika se izrađuju razni ukrasni predmeti i dijelovi kućanskih aparata. Korozijska otpornost feritnih čelika se može povisiti dodatnim legiranjem sa Cr i Mo, ali pozitivno utječe i daljnje snižavanje udjela ugljika. Razvijeni su i čelici s vrlo niskim sadržajem intersticijskih elemenata ($C+N \leq 0,04$), „superferitni“ čelici, koji imaju povišenu postojanost u uvjetima napetostne korozije, pitinga i lužnatih medija [22].

Feritni nehrđajući čelici su skloni pojavi interkristalne korozije. Kod feritnih nehrđajućih čelika sposobnost rastvaranja C i N je vrlo mala, ali je nasuprot tome difuzija rastvorenih legirajućih i pratećih elemenata u BCC-strukturi bitno veća pri svakoj temperaturi u odnosu na FCC strukturu. Zbog toga su toplinski procesi aktivni, kao što je izlučivanje raznih precipitata ili rast zrna, puno brži i intenzivniji nego kod austenitnih čelika. [22]

Za feritne čelike je također karakteristično pogrubljenje zrna na temperaturama iznad 850 °C. Ovi čelici nemaju sposobnost naknadnog „dotjerivanja“ strukture putem toplinske obrade. Taj je problem posebno izražen kao posljedica rezanja u područjima ZUT-a gdje se tijekom rezanja stvaraju visoke temperature.

Uz navedene specifičnosti za feritne čelike potrebno je još navesti sklonost stvaranju δ -faze (FeCr) pri držanju u temperaturnom rasponu od 520° do 850°C. Pri tehnološkim operacijama rezanja, valjanja, kovanja, zavarivanja mora se ponekad računati s prisutnošću te faze. Izlučivanje δ -faze se može poput precipitata karbida ili nitrata dokazati svjetlosnom mikroskopijom. Ta intermetalna faza povećava čvrstoću i tvrdoću, a znatno snižava žilavost i otpornost koroziji.

Pojava „krhkosti 475“ javlja se pri duljem zadržavanju u temperaturnom rasponu od 350° do 520°C. Učinak je intenzivniji s povećanjem Cr u čeliku, a i ostalih α -genih elemenata (na primjer Mo). U tom temperaturnom području javlja se pojava očvršćivanja i otvrdnjavanja koja se izražava kao tzv. „krhkost 475“. Ta pojava, o čijim se fizikalnim temeljima zna vrlo malo, posljedica je fine submikroskopske jednofazne segregacije koja se ne može ustanoviti svjetlosnom mikroskopijom. Rezultati nastanka „krhkosti 475“ su smanjenje duktilnosti, a povećanje čvrstoće i tvrdoće.[22]

8.3. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni čelici obično sadrže krom u postotcima između 12 i 16%, a ugljik između 0,1 i 1%. Čelici martenzitnog tipa s relativno malim sadržajem ugljika (0,17 – 0,22% C, 12 – 14% Cr, oznake AISI 420) imaju čvrstoću od 650 do 950 N/mm², a ovisno o toplinskoj obradi imaju tvrdoću 180 do 275 HB [24].

Primjenjuju se za dijelove koji rade u vodi i vodenoj pari, npr. turbinske lopatice, osovine, vretena, kugle i sjedišta u armaturi za vodu ili paru, za nehrđajuće kirurške instrumente. Krom povećava zakaljivost čelika i do stvaranja martenzita dolazi i na malim presjecima, čak ako se hlađenje vrši na zraku. Razlog tome je veoma mala kritična brzina hlađenja, odnosno pretvorba austenita u martenzit. Zavarljivost je loša jer je veoma teško izbjeći zakaljivanje prijelazne zone. Tvrdoća martenzita i u ovom slučaju ovisi o sadržaju ugljika. Kod čelika s niskim sadržajem ugljika, martenzit je relativno istezljiv i ima razmjerno nisku tvrdoću. Stoga čelici s manjim sadržajem ugljika nisu toliko skloni stvaranju pukotina kao oni koji imaju više ugljika.

Vjerojatnost nastanka hladnih pukotina, naročito u posljednjoj fazi neprekinutog hlađenja (na temperaturama ispod 100 do 120°C), povećava se pri povećanom sadržaju vodika u metalu zavara. [22]

8.4. Dupleks nehrđajući čelici

Dupleks nehrđajući čelici počinju se primjenjivati od 1930. g. razvitkom čelika kvalitete AISI 329. Iako tek 1970-ih ulaze u masovnu upotrebu zbog povećane upotrebe AOD postupka kojim je omogućena proizvodnja legura s izuzetno niskim udjelom ugljika te precizan nadzor nad sastavom legure tokom cijelog procesa proizvodnje. Struktura im je dvofazna i sastoji se od otprilike 50% ferita i 50% austenita.

Ovi čelici imaju povećanu otpornost prema napetostnoj koroziji i utjecaju klorida, a imaju bolju otpornost na opću i rupičastu koroziju u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Čvrstoća ovih čelika je također veća u odnosu na čvrstoću austenitnih čelika. Dupleks nehrđajuće čelike moguće je podijeliti u tri generacije. Glavna razlika između prve i druge generacije je u tome da druga generacija sadrži namjerno dodan dušik, između 0,1 i 0,25%, dok je obilježje treće generacije $PREN > 40$. Pritom, PREN, tj. djelotvorna suma koja se često uzima u obzir kada se procjenjuje otpornost rupičastoj koroziji, računa se prema izrazu (1). [25]

$$PREN = Cr + 3,3(Mo + 0,5W) + 16N \quad (1)$$

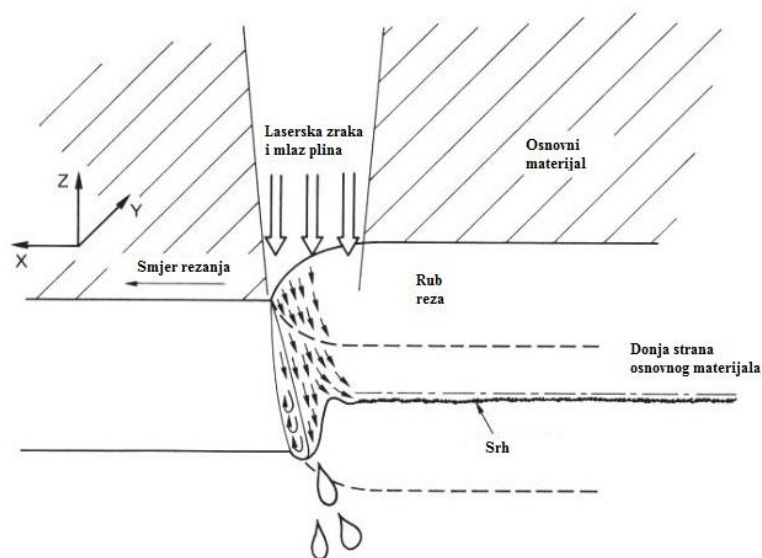
9. LASERSKO REZANJE NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Lasersko rezanje inertnim plinom je najčešće korištena tehnologija za rezanje nehrđajućih čelika. Lasersko rezanje kisikom primjenjuje se kod konstrukcija gdje oksidacija reza nije problem. Kod jedne i druge tehnologije rezanja treba obratiti posebnu pozornost na sigurnost radnog mjesta zbog formiranja potencijalno opasnih dimnih plinova.

9.1. Lasersko rezanje nehrđajućih čelika inertnim plinom

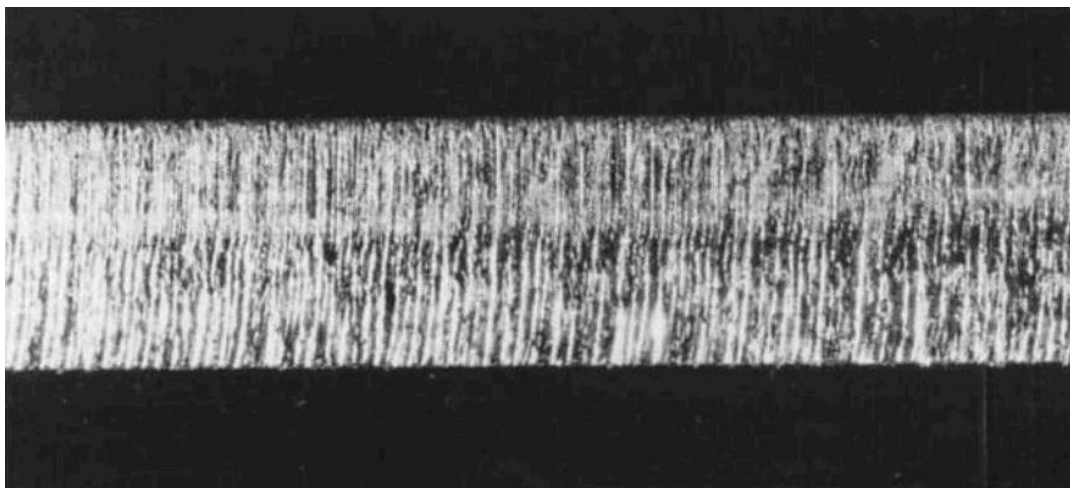
Za vrijeme rezanja inertnim plinom (rezanje taljenjem), laserska zraka je jedini izvor topline, dok mlaz inertnog plina, pod velikim tlakom, osigurava dovoljnu mehaničku energiju za otpuhivanje taline. Nehrđajući čelici imaju relativno malu toplinsku provodljivost, koja im omogućuje rezanje relativno visokim brzinama jer se toplina zadržava oko samog reza umjesto da se gubi u osnovnom materijalu. [14]

Dušik se najviše koristi kod ove tehnologije zbog svoje niske kemijske aktivnosti te niske cijene u usporedbi s pravim inertnim plinovima, argonom i helijem. Rezanje s dušikom stvara rezove visoke kvalitete, ali je brzina rezanja niža nego kod rezanja s kisikom. Pojava srha s donje strane, zbog visoke viskoznosti rastaljenog materijala, može biti problem kod rezanja s dušikom, ali se rješava upotrebom većeg tlaka plina. Visoki tlak plina se koristi kad je kvaliteta reza važnija od brzine rezanja. Slika 16. prikazuje shemu zone laserskog rezanja nehrđajućeg čelika gdje se vidi pojava srha s donje strane osnovnog materijala. [12,14]



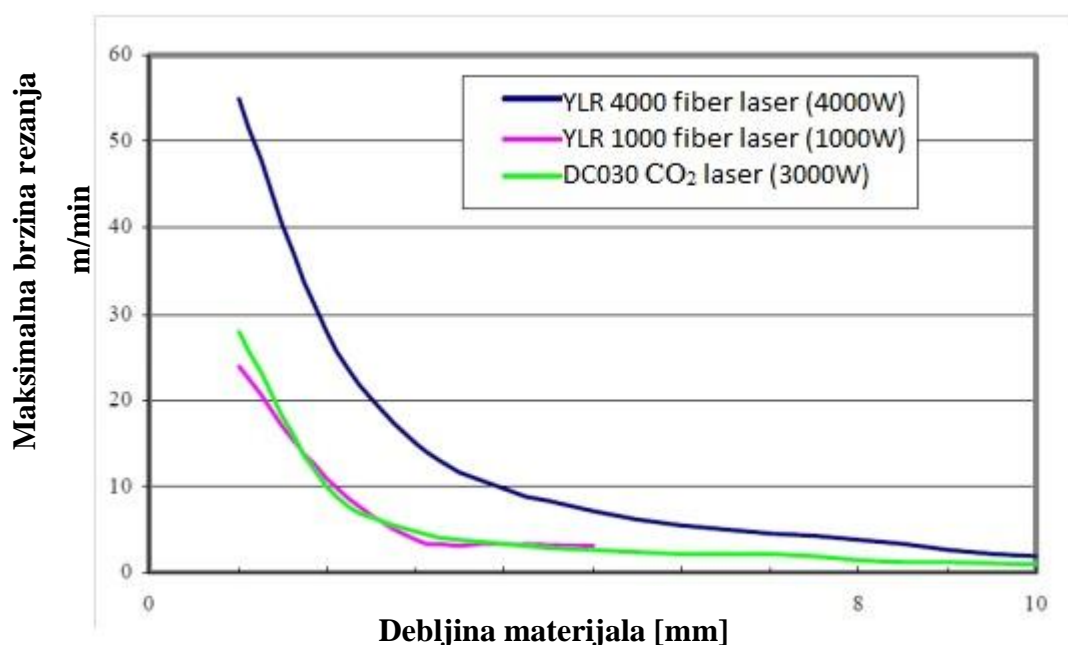
Slika 16. Shema zone reza laserskog rezanja nehrđajućih čelika [12]

Slika 17. prikazuje rez dobre kvalitete izrađen tehnologijom laserskog rezanja inertnim plinom. Osnovni materijal je nehrđajući čelik 5 mm debljine, rezan CO₂ laserom s tlakom plina od 14 bar, brzina rezanja je 1.1 m/min uz snagu lasera 1.4 kW. [12]



Slika 17. Rez nehrđajućeg čelika izrezan laserskim rezanjem dušikom [12]

Usporedba maksimalnih brzina rezanja nehrđajućeg čelika kvalitete AISI 304 s CO₂ i fiber laserom je prikazana slikom 18. Veće brzine rezanja se postižu s fiber laserima. [7]

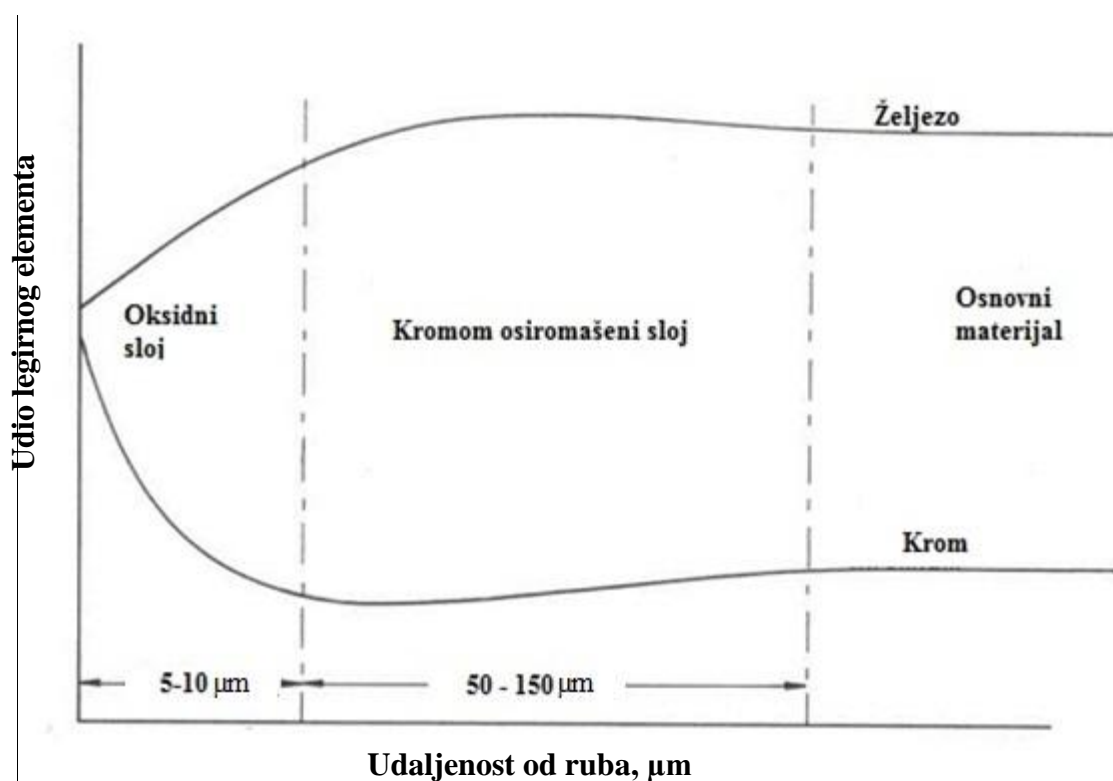


Slika 18. Usporedba maks. brzine rezanja kod različitih vrsta lasera, (AISI 304) [7]

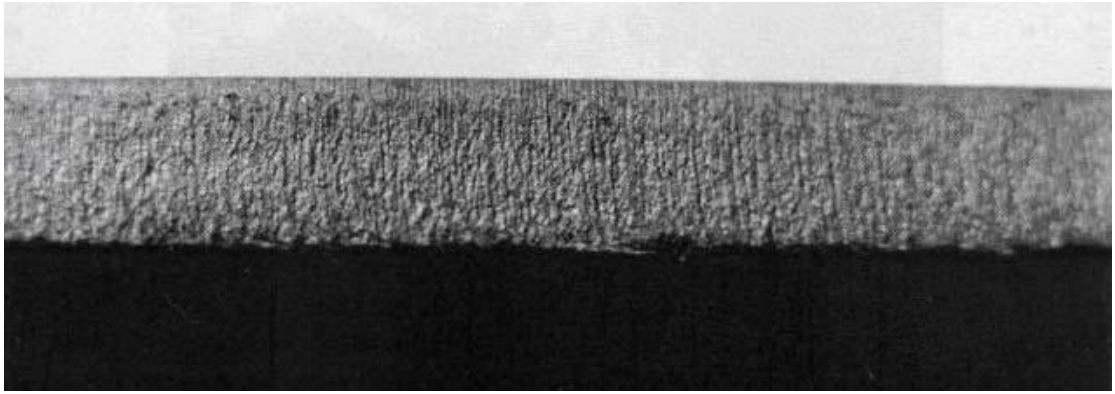
9.2. Lasersko rezanje nehrđajućih čelika kisikom

Za vrijeme rezanja nehrđajućeg čelika kisikom, krom, koji ima veliki afinitet prema kisiku, oksidira tvoreći okside s visokom temperaturom taljenja. Ovi oksidi se ne otapaju u rastaljenom materijalu nego tvore granicu koja ograničava egzotermnu reakciju na vrhu zone rezanja. Visoka površinska napetost oksida vodi do pojave srha i grube površine reza. Zaostali oksidni sloj na površini reza ima povećanu količinu kroma nego osnovni materijal dok je sloj ispod oksidnog osiromašen kromom, i drugi legirni elementi mogu stvoriti probleme ako reagiraju s aktivnim plinovima. [12,14]

Slika 19. shematski prikazuje kemijske promjene u zoni rezanja nehrđajućeg čelika, a slika 20. prikazuje kvalitete reza ostvarive laserskim rezanjem s kisikom.



Slika 19. Kemijske promjene u zoni rezanja nehrđajućeg čelika [12]



Slika 20. Rez na radnom komadu nehrđajućeg čelika kod laserskog rezanja kisikom [12]

Oksidacija nehrđajućeg čelika za vrijeme rezanja je složenija nego kod mekog čelika jer reakcije uključuju formiranje tri različita oksida (Fe_2O_3 , Cr_2O_3 i NiO) za razliku od dva (FeO i Fe_2O_3) kod rezanja nelegiranog čelika. Formiranje tri oksida generira više topline za razliku od oksidacije željeza u FeO . Stoga se kod rezanja kisikom postižu veće brzine rezanja nego kod rezanja taljenjem. Brzina rezanja drastično opada povećanjem debljine osnovnog materijala te su potrebne veće snage rezanja.[12]

10. USPOREDBA CIJENE I KVALITETE REZANJA LASERA S OSTALIM TEHNOLOGIJAMA

Svjetska ekonomska kriza je uzrokovala pad u proizvodnji u industrijskom sektoru. Kao rezultat krize mnoge tvrtke pokušavaju srezati troškove u cilju održavanja konkurentnosti na tržištu. Jedna od početnih operacija u proizvodnji je rezanje materijala. Unaprijeđenje tehnologije rezanja materijala je u stalnom porastu. Rezanje se razvijalo od klasične tehnologije bazirane na plastičnoj deformaciji (škare) i tehnologijama s reznim materijalima (rezne ploče, tračne pile...) prema novim tehnologijama baziranim na isparavanju materijala (plazma, laser) i tehnologija s fizičko-kemijskim reakcijama (plinsko rezanje). Netradicionalne tehnologije su razvijane kao odgovor na povećane zahtjeve točnosti, poput:

- Potrebe za obradom novo razvijenih metala i nemetala (visoka čvrstoća, tvrdoća...);
- Potrebe za kompleksnim geometrijama;
- Izbjegavanje oštećenja površine. [26]

Svrha ove analize je procjena troškova tehnologija rezanja materijala. Široka definicija troškova je povezana s ekonomskim resursima (ljudskom snagom, opremom, pogonom, zalihama...) potrebnim za ostvarivanje proizvodnje. Troškovi se prikazuju u jedinicama valute. Stoga su troškovi količina novca koja predstavlja sredstva potrošena za proizvodnju. Dvije glavne klasifikacije troškova su s jedne strane direktni i indirektni troškovi, s druge strane konstantni i varijabilni troškovi. Direktni troškovi su troškovi koji se mogu točno identificirati (proizvod, usluga, software, projekt), dok su indirektni troškovi oni koji nisu jasno prikazani te tek trebaju biti utvrđeni. Varijabilni troškovi se mijenjaju sa stopom proizvodnje i brzinom usluge.

Rezanje plazmom je erozijski proces koji koristi plazma luk u obliku mlaza ioniziranog plina velike brzine da bi rastopio i razrezao metal. Luk je usmjeren uz pomoć sapnice na jako malu površinu radnog komada. Metal se tali zbog velikog unosa topline te se onda ispuhuje iz zone reza mlazom plina. Plazma rezanje se može koristiti na bilo kojem materijalu koji provodi električnu energiju. [26]

Plinsko rezanje objedinjuje tehnologije koje koriste kontroliranu kemijsku reakciju za odstranjivanje prethodno zagrijanog metala oksidacijom u struji čistog kisika. Ovaj proces počinje podizanjem temperature na 870°C s plinskim plamenom. Kada se postigne potrebna temperatura, mlaz kisika se usmjerava na zagrijanu površinu što uzrokuje brzu oksidaciju koja proizvodi veliku količinu topline. Metal zatim izgara u struji čistog kisika.

Za usporedbu navedenih tehnologija s laserskim rezanjem izrezan je konstrukcijski čelik ES355J0. Kemijski sastav materijala je prikazan tablicom 5.

Tablica 5. Kemijski sastav materijala EN S355J0 [26]

C	Mn	Si	P	S	N
Max. 0,2	Max. 1,60	Max. 0,55	Max. 0,04	Max. 0,04	Max. 0,009

Izrezani uzorci su veličine 150 x 150 mm debljina 10 mm, 15 mm, i 20 mm. Proces rezanja je izveden s optimalnim parametrima. Uređaj korišten za plinsko rezanje je Multitherm 3100 proizvođača Messer Cutting System, za plazma rezanje Advanced HD 3070, a za lasersko rezanje Platino 2040/ CP 3500. [26]

Za usporedbu uspoređivana je količina uzoraka koji se mogu proizvesti u zadanom vremenu na određenom uređaju. Brzina rezanja je bitan faktor za određivanje količine proizvedenih dijelova. Najveća brzina rezanja kod svih debljina je kod plazma rezanja. Kod laserskog rezanja se primjećuje linearni pad brzine raznja povećanjem debljine materijala. Plinsko rezanje je četiri puta sporija tehnologija ali je brzina rezanja minimalno varirala promjenom debljine materijala. Tablicom 6 su prikazane brzine rezanja i izračunati broj dijelova koji se mogu izrezati za sat vremena.

Tablica 6. Usporedba brzina rezanja pojedine tehnologije [26]

Tehnologija	Debljina, mm	Brzina rezanja, mm/min	Broj izrezanih dijelova po satu
Multitherm 3100	10	561	56
	15	503	51
	20	471	47
Advanced HD 3070	10	2300	230
	15	1200	120
	20	1000	100
Platino 2040/ CP 3500	10	1500	150
	15	1100	110
	20	760	76

Kao što je prikazano u tablici 6 plazma može proizvoditi najviše dijelova za sat vremena (230), laser je sljedeći po brzini rezanja, 150 dijelova za sat vremena, dok je plinsko rezanje najsporije (56 dijelova). Iz dobivenih podataka može se izračunati relni troškovi po satu. Troškovi rada opreme N_t mogu se izračunati po sljedećem izrazu:

$$N_t = \frac{N_z}{t_{ABC}} \quad (2)$$

gdje N_z predstavlja godišnji trošak opreme a t_{ABC} je broj radnih sati na godinu (2000 sati na godinu u jednoj smjeni). Za određivanje troška po komadu treba podijeliti operative troškove po satu s brojem dijelova proizvedenih u tom satu. prethodno je potrebno izračunati operative troškove po satu koji mogu varirati. troškovi po komadu:

- S plinskim rezanjem je proizvedeno 56 dijelova (10 mm), po cijeni 13,7 centa po komadu;
- S plazma rezanjem je proizvedeno 230 dijelova (10 mm), po cijeni 13,5 centa po komadu;
- S laserskim rezanjem je proizvedeno 150 dijelova (10 mm), po cijeni 28,5 centa po komadu.

Operativni troškovi su procijenjeni na temelju zadanih parametrima rezanja, a raspravljani su sa stručnjacima iz procjene troškova svake od tvrtki gdje je izvršeno rezanje, tako da troškovi uvelike ovise o lokaciji. Troškovi plina, energije i potrošnog materijala su izračunati prema trenutnim. cijenama. Ovisno o tehnologiji rezanja drugačije varijable se koriste za izračun troškova (tablica 7.). Ukupan trošak plazma i plinskog rezanja je približno jednak dok je lasersko rezanje znatno skuplje.

Tablica 7. Procjena troškova rezanja [26]

Tehnologija	Plazma	Laser	Plinsko
Cijena plina	4,08 €/h	7 €/h	3,7 €/h
Cijena el. energije	8,1 €/h	7,5 €/h	-
Broj sati rada godišnje	1600 h	1600 h	1600 h
Troškovi kamate	6750 €/god	9500 €/god	1250 €/god
Troškovi amortizacije	27 000 €/god	38 000 €/god	5000 €/god
Troškovi osiguranja	6750 €/god	9500 €/god	1250 €/god
Troškovi prostora	3840 €/god	3840 €/god	3840 €/god
Troškovi održavanja	5400 €/god	7600 €/god	1000 €/god
Cijena rada stroja po satu	31,0875 €/h	42,775 €/h	7,71 €/h
Broj radnih glava	1	1	1
Cijena radne glave	2,6 €/h	0,2 €/h	0,25 €/h
Broj katoda	1	-	-
Cijena katoda	1,2 €/h	-	-
Broj leća	-	1	-
Cijena leća	-	0,8 €/h	-
Ukupna duljina reza	0,60 m	0,60 m	0,60 m
Vrijeme početka rezanja	0,001 h	0,0008 h	0,0027 h
Vrijeme rezanja	0,0043 h	0,0066 h	0,015 h
Trošak radne snage	7,46 €/h	8,77 €/h	7,57 €/h
Ukupan trošak plinova	0,0175 €/h	0,0462 €/h	0,055 €/h
Ukupan trošak el. energije	0,0348 €/h	0,05 €/h	-
Ukupan trošak rada stroja	0,133 €/h	0,2823 €/h	0,12 €/h
Trošak radnih glava	0,011 €/h	0,00132 €/h	0,00375 €/h
Trošak katoda / leća	0,00516 €/h	0,00528 €/h	-
Ukupan trošak rezanja	7,66 €/h	9,16 €/h	7,75 €/h
Snaga po satu	139,53 W/h	90,91 W/h	40 W/h
Cijena po metru	0,055 €/m	0,1 €/m	0,19 €/m

Svaka od ovih metoda ima svoje prednosti i mane, a odabir ovisi isključivo o potrebama proizvođača. Iz prethodne analize očito je da svaki od procesa ima različite troškove. Proračun je napravljen da bi se dobio uvid koja je tehnologija rezanja najbolja. Iz tablice 7 se vidi da je maksimalna snaga po satu (kod iste debljine materijala) potrebna prilikom plazma rezanja a minimalna kod plinskog. Međutim po cijeni rezanja po metru plazma rezanje je najekonomičnije i to 1,82 puta jeftinije od laserskog rezanja i 3,45 jeftinije od plinskog rezanja. Operativni troškovi plinskog rezanja su prilično niski, 4 puta niži od plazma rezanja i 6 puta niži od laserskog rezanja. [26]

Laser dobija veliku brzinu rezanja od egzotermne reakcije kada se kao dodatni plin koristi kisik, npr. pri rezanju nelegiranih čelika. Međutim, kod rezanja radnih komada od nehrđajućeg čelika i aluminijskog to nije primjenjivo. U toj primjeni se kao zaštitni plin koristi dušik. Zbog korištenja velike količine dušika, i neostvarivanja velikih energija od egzotermnih reakcija, brzine rezanja su puno manje te se samim time troškovi rezanja znatno povećavaju. Ako u industrijskoj aplikaciji nema potrebe za velikom kvalitetom ruba reza i jako uskim tolerancijama, plazma rezanje daje velike uštede u samoj tehnologiji rezanja kod debljih materijala. Prava prednost lasera dolazi do izražaja kod velikih serijskih proizvodnja radnih komada manjih debljina (< 10 mm) jer se ostvaruju velike uštede na energiji i vremenima rezanja u usporedbi s plazma i plinskim rezanjem.

11. NORMA HRN EN ISO 9013:2002 – TOPLINSKA REZANJA – KLASIFIKACIJA TOPLINSKIH REZANJA

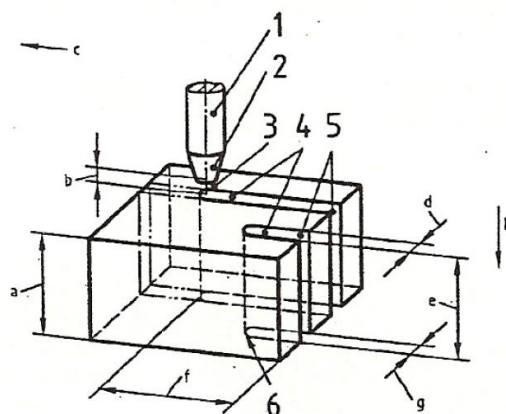
11.1. Područje primjene

Međunarodna norma HRN EN ISO 9013:2002 odnosi se na materijale koji su prikladni za plinsko rezanje te rezanje plazmom i laserom. Primjenjuje se za plinsko rezanje debljina radnih komada 3 mm do 300 mm, plazma rezanje debljina radnih komada 1 mm do 150 mm i za lasersko rezanje debljina radnih komada 0,5 mm do 40 mm. Ova međunarodna norma uključuje geometrijsku specifikaciju proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće. Geometrijske specifikacije proizvoda su primjenjive ako je napravljena referenca prema ovoj međunarodnoj normi u crtežima ili relevantnim dokumentima. Isto tako ukoliko se norma primjenjuje za druge postupke rezanja (npr. rezanje vodenim mlazom), mora se naknadno dobiti odobrenje za korištenje norme. Sljedeći dokumenti norme sadrže odredbe koje su potkrijepljene referencama u tekstu, uključujući i odredbe ove međunarodne norme:

- ISO 1101:1983, Tehnički crteži – Geometrijska odstupanja – Odstupanja oblika, položaja, orijentacije – Definicije, simboli, oznake na crtežu
- ISO 1302:2002, Geometrijske specifikacije proizvoda – Oznaka sastava površine u tehničkoj dokumentaciji
- ISO 2553, Zavareni, lemljeni spojevi – Prikazivanje na crtežima
- ISO 8015, Tehnički crteži – Osnovni principi označavanja odstupanja

11.2. Izrazi i definicije objašnjeni slikama

Za uporabu ove međunarodne norme upotrebljavaju se sljedeći izrazi i definicije koji su prikazani i objašnjeni slikama. Za imenice koje se odnose na proces rezanja koristi se izraz „rezanje“, dok se za imenice koje se odnose na obavljanje reza koristi riječi „rez“. Slika 21. pokazuje izraze koji se odnose na proces rezanja radnog komada nakon početka samog procesa rezanja, dok slika 22. pokazuje izraze koji se odnose na gotovi radni komad. [17]



1 – Gorionik

2 – Sapnica

3 – Zraka/Plamen/Električni luk

4 – Širina reza

5 – Početak reza

6 – Kraj reza

a – Debljina radnog komada

b – Udaljenost sapnice od radnog komada

c – Smjer napredovanja rezanja

d – Širina gornjeg reza

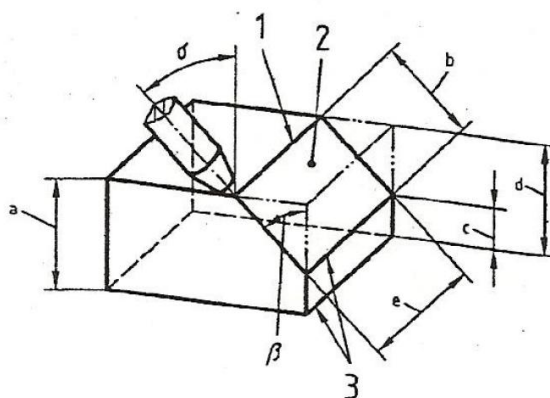
e – Debljina reza

f – Duljina reza

g – Širina donjeg reza

h – Smjer rezanja

Slika 21. Proces rezanja radnog komada s odgovarajućim izrazima [17]



1 – Gornji rub reza

2 – Površina reza

3 – Donji rub reza

a – Debljina radnog komada

b – Debljina reza (prva mogućnost)

c – Visina grla žlijeba/debljina reza (prva mogućnost)

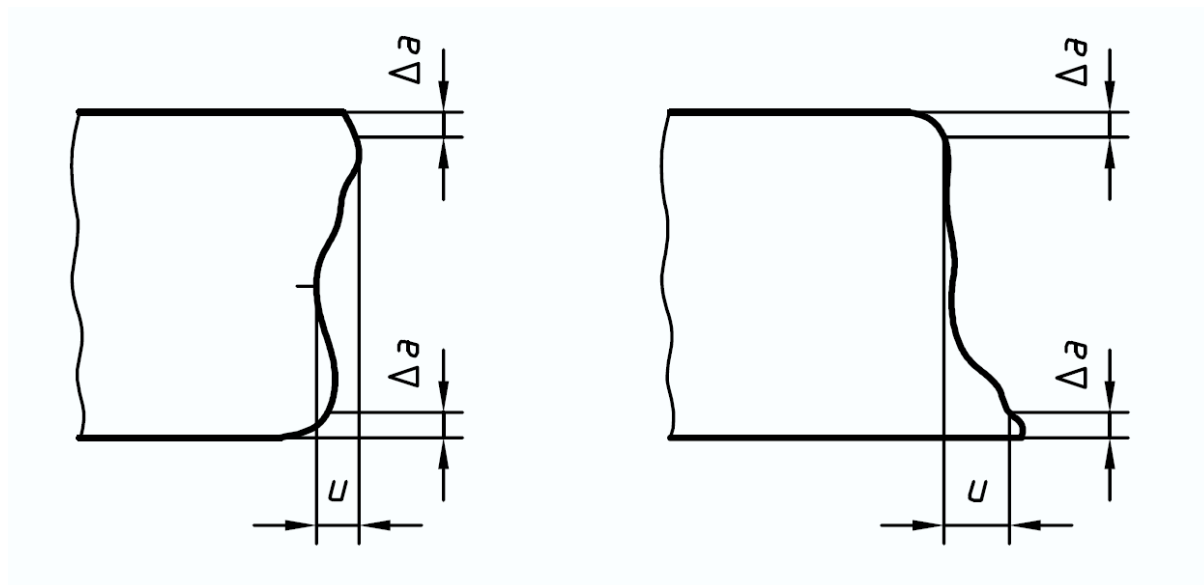
d – Debljina reza (druga mogućnost)

e – Duljina reza

Slika 22. Gotovi radni komad s odgovarajućim izrazima [17]

11.3. Tolerancije kuta ili okomitosti

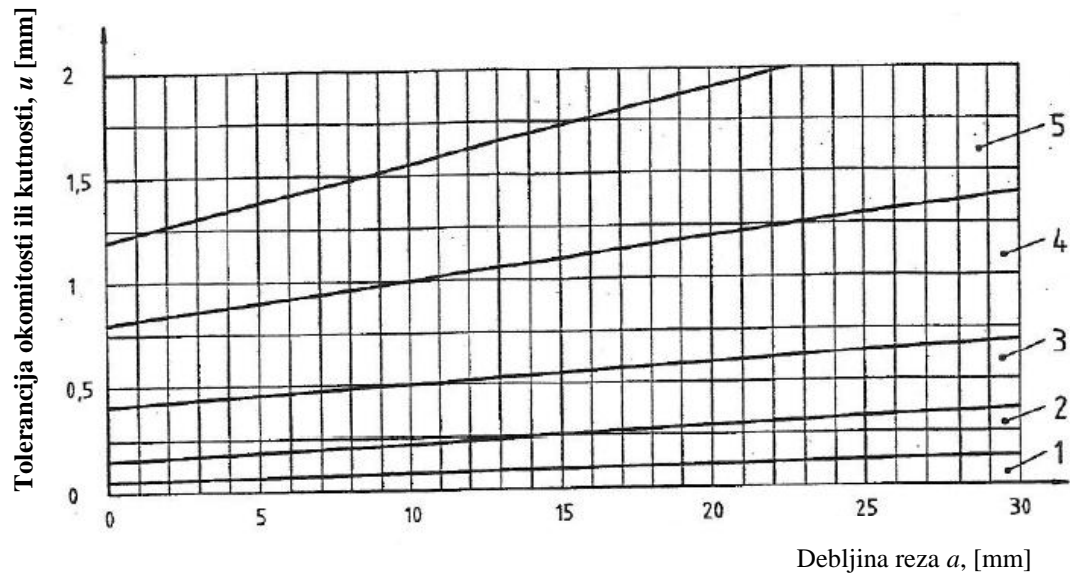
Udaljenost između dva pravca (tangente) kojima je obuhvaćena površina reza, unutar kuta namještanja (npr. 90° u slučaju vertikalnih rezova) označava se oznakom u . Tolerancije kuta ili okomitosti ne uključuje samo okomitost nego i odstupanje od ravnoće. Slika 23. pokazuje maksimalna odstupanja unutar klase tolerancije gdje “ Δa ” označava smanjenje debljine a “ u ” toleranciju okomitosti ili kutnosti.



Slika 23. Tolerancija okomitosti ili kutnosti [17]

Tablica 8. Rasponi tolerancije okomitosti ili kutnosti, u [17]

Raspon	Tolerancija okomitosti u , [mm]
1	$0,05 + 0,003a$
2	$0,15 + 0,007a$
3	$0,4 + 0,01a$
4	$0,8 + 0,02a$
5	$1,2 + 0,035a$



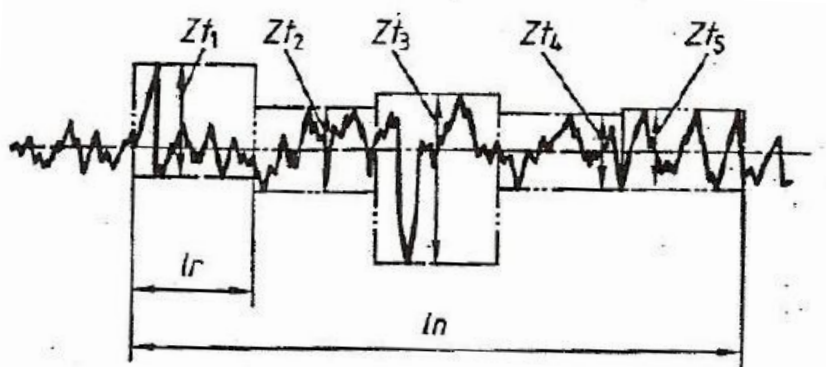
Slika 24. Tolerancije okomitosti ili kutnosti, radni komad do 30 mm [17]

11.4. Visina profila

Visina profila se označava oznakom Zt . Visina profila predstavlja zbroj visine vrha i dubine dna elementa profila.

11.5. Prosječna visina neravnina

Aritmetička sredina od pet pojedinačnih izmjerenih udaljenosti profila se označava oznakom $Rz5$. Indeks 5 u $Rz5$ dodan je kako bi se istaknula aritmetička sredina i maksimalna visina profila od pet pojedinačnih elemenata.



Gdje su:

$Zt1 - Zt5$ – pojedinačne visine profila

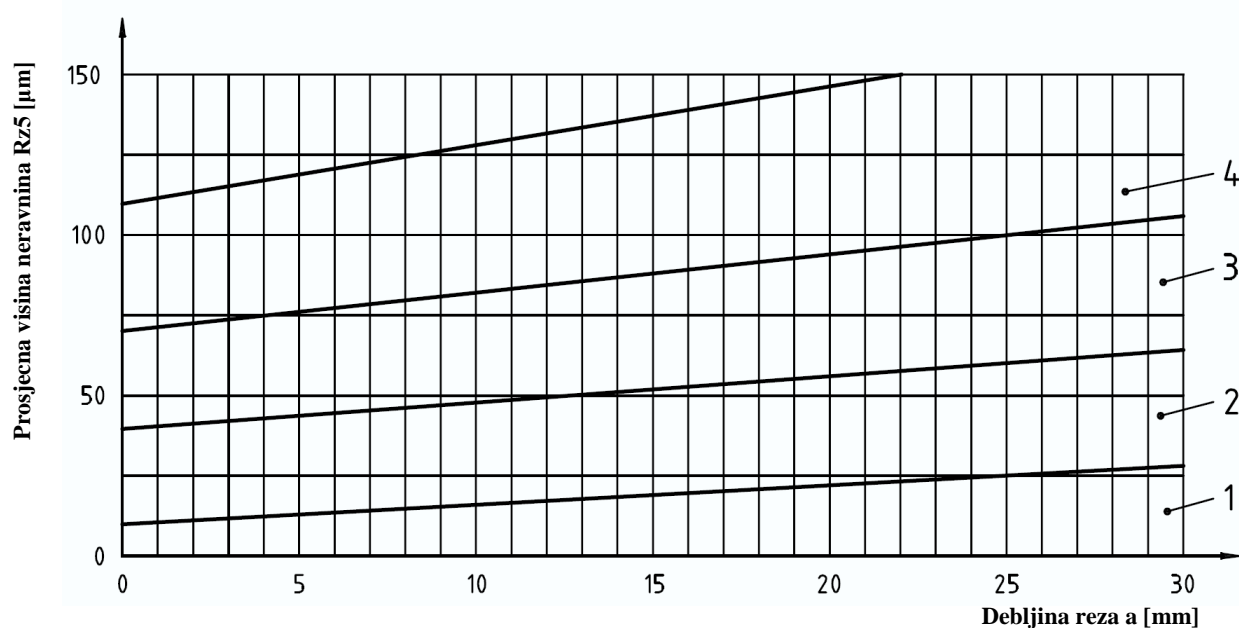
ln – duljina vrednovanja

lr – pojedinačna duljina uzorka profila hrapavosti (1/5)

Slika 25. Prosječna visina neravnina [17]

Tablica 9. Rasponi tolerancije hrapavosti, $Rz5$

Raspon	Hrapavost $Rz5$, μm
1	$10 + (0,6a \text{ mm})$
2	$40 + (0,8a \text{ mm})$
3	$70 + (1,2a \text{ mm})$
4	$110 + (1,8a \text{ mm})$

**Slika 26.** Tolerancije hrapavosti, radni komad do 30 mm

11.6. Dimenzionalne tolerancije

Dimenzije u crtežima se trebaju uzimati kao nominalne dimenzije, dok se stvarne dimenzije utvrđuju na čistim površinama reza. Granična odstupanja navedena u tablicama 8. i 9. će se primjenjivati na dimenzije bez oznake tolerancija, gdje je napravljena referenca prema ovom međunarodnom standardu ili prema drugim dokumentima.

Za lasersko rezanje, podržive dimenzionalne tolerancije jako ovise o geometriji radnog komada, kao i o samim prethodnim obradama radnog komada.

Granična odstupanja kvalitete površine reza (tolerancije okomitosti ili kutnosti) su obrađena odvojeno od graničnih odstupanja za dimenzionalne tolerancije radnog komada, sve kako bi se naglasili različiti utjecaji na radni komad.

Definicije za granična odstupanja su bazirane na neovisnim principima opisanim u ISO 8015, prema kojem se dimenzionalne tolerancije, te geometrijske i tolerancije oblika upotrebljavaju neovisno jedna o drugoj. Granična odstupanja ne uključuju odstupanja od okomitosti ili kutnosti.

Tablica 10. Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 1 [17]

Debljina radnog komada, mm	Nominalne dimenzije							
	$> 0 < 3$	$\geq 3 < 10$	$\geq 10 < 35$	$\geq 35 < 125$	$\geq 125 < 315$	$\geq 315 < 1000$	$\geq 1000 < 2000$	$\geq 2000 < 4000$
	Granična odstupanja							
$> 0 \leq 1$	$\pm 0,04$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$
$> 1 \leq 3,15$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$
$> 3,15 \leq 6,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$
$> 6,3 \leq 10$	-	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$
$> 10 \leq 50$	-	$\pm 0,6$	$\pm 0,7$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	± 1	$\pm 1,6$	$\pm 2,5$
$> 50 \leq 100$	-	-	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,7$	$\pm 2,2$	$\pm 3,1$
$> 100 \leq 150$	-	-	$\pm 1,9$	± 2	$\pm 2,1$	$\pm 2,3$	$\pm 2,9$	$\pm 3,8$
$> 150 \leq 200$	-	-	$\pm 2,6$	$\pm 2,7$	$\pm 2,7$	± 3	$\pm 3,6$	$\pm 4,5$
$> 200 \leq 250$	-	-	-	-	-	$\pm 3,7$	$\pm 4,2$	$\pm 5,2$
$> 250 \leq 300$	-	-	-	-	-	$\pm 4,4$	$\pm 4,9$	$\pm 5,9$

Tablica 11. Granična odstupanja za nominalne dimenzionalne tolerancije – klasa 2

Debljina radnog komada, mm	Nominalne dimenzije							
	$> 0 < 3$	$\geq 3 < 10$	$\geq 10 < 35$	$\geq 35 < 125$	$\geq 125 < 315$	$\geq 315 < 1000$	$\geq 1000 < 2000$	$\geq 2000 < 4000$
	Granična odstupanja							
$> 0 \leq 1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	$\pm 0,9$
$> 1 \leq 3,15$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	± 1	$\pm 1,1$
$> 3,15 \leq 6,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 0,9$	$\pm 1,1$	$\pm 1,2$	$\pm 1,3$	$\pm 1,3$
$> 6,3 \leq 10$	-	± 1	$\pm 1,1$	$\pm 1,3$	$\pm 1,4$	$\pm 1,5$	$\pm 1,6$	$\pm 1,7$
$> 10 \leq 50$	-	$\pm 1,8$	$\pm 1,8$	$\pm 1,8$	$\pm 1,9$	$\pm 2,3$	± 3	$\pm 4,2$
$> 50 \leq 100$	-	-	$\pm 2,5$	$\pm 2,5$	$\pm 2,6$	± 3	$\pm 3,7$	$\pm 4,9$
$> 100 \leq 150$	-	-	$\pm 3,2$	$\pm 3,3$	$\pm 3,4$	$\pm 3,7$	$\pm 4,4$	$\pm 5,7$
$> 150 \leq 200$	-	-	± 4	± 4	$\pm 4,1$	$\pm 4,5$	$\pm 5,2$	$\pm 6,4$
$> 200 \leq 250$	-	-	-	-	-	$\pm 5,2$	$\pm 5,9$	$\pm 7,2$
$> 250 \leq 300$	-	-	-	-	-	± 6	$\pm 6,7$	$\pm 7,9$

Ako crtež i ne sadrži oznake dodatka za završnu obradu, u praksi se predviđaju dimenzije za taj dodatak u ovisnosti o debljini lima, prema tablici 12.

Tablica 12. Dodatak za završnu obradu [17]

Debljina reza, a , mm	Dodatak za završnu obradu za svaku površinu reza, B_z
$\geq 2 \leq 20$	2
$\geq 20 \leq 50$	3
$\geq 50 \leq 80$	5
> 80	7

12. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj ovog eksperimenta je pronalazak optimalnih parametara rezanja CO₂ laserom na visokolegiranom nehrđajućem čeliku debljina 2,5 mm, 5 mm i 10 mm različitim brzinama rezanja sukladno standardima kvalitete HRN EN ISO 9013:2002, kako bi rezna površina bila prikladna za zavarivanje bez daljnje strojne obrade ili brušenja. Naknadno je provedeno ispitivanje mikrostrukture u zoni utjecaja topline kod uzoraka s optimalnim parametrima rezanja.

12.1. Oprema za CO₂ lasersko rezanje

Prilikom provedbe eksperimenta korišten je laser Bystar L 4025-65, tvrtke Dok-Ing d.o.o. iz Zagreba. To je CO₂ laser snage 6000W. Pri rezanju nehrđajućih čelika koriste se plinovi CO₂, He i N₂. Mogu se rezati nehrđajući čelici debljina do 25 mm, a koristi se i za rezanje nelegiranih čelika, kao i za rezanje aluminija debljina do 8 mm. S optimalnim parametrima moguće je dobiti rezove visoke kvalitete.

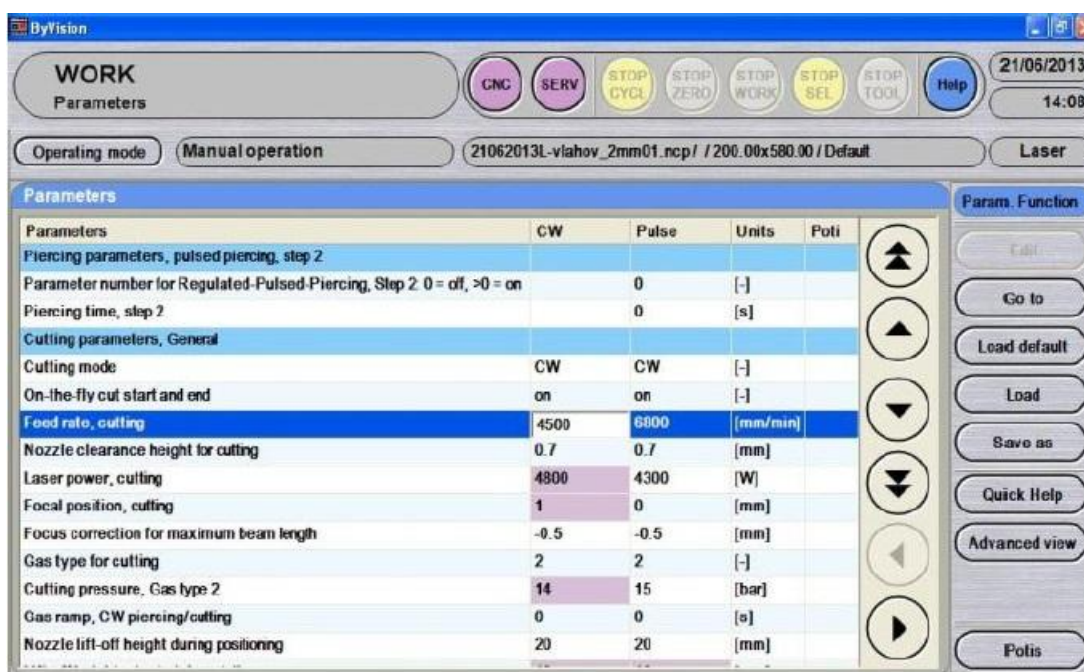
Tablica 13. Karakteristike stroja Bystar L 4025-65

Stroj za lasersko rezanje	Bystar L 4025-65
Nominalna veličina ploče	x=6500 mm; y=2540 mm
Radna površina	x=6500 mm; y=2540 mm; z=170 mm
Max. brzina pozicioniranja po x/y os	60 m/min
Max. brzina pozicioniranja dijagonalno	85 m/min
Max. akceleracija po osi	3 m/s ²
Točnost pozicioniranja	± 0,1mm
Ponovljivost	± 0,05mm
Max. masa radnog komada	3200kg
Masa stroja (bez jedinice hlađenja)	32 000kg

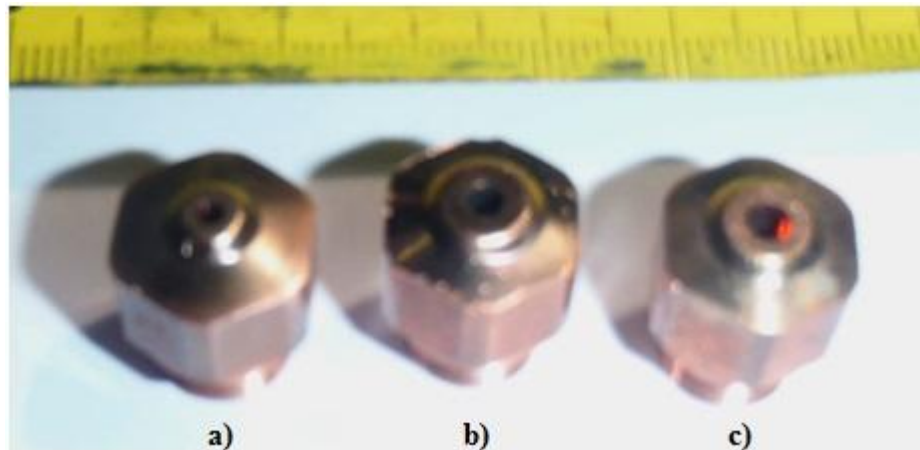
Tablica 14. Karakteristike laserskog izvora ByLaser 6000

Izvor laserske zrake	ByLaser 6000
Snaga	6000 W
Valna duljina	10,6 μm
Polarizacija	Kružna
Frekvencija	1 – 2500Hz
Max. debljina ploče	
Čelik	25mm
Nehrđajući čelik	25mm
Aluminij	15mm
Potrošnja el. energije	78kW

Korisničko sučelje je podržano programskim paketom ByVision također tvrtke Bystronic koje radi na operativnom sistemu Windows XP. Sučelje može biti upravljano s tipkovnicom i mišem ili preko dodirnog zaslona. Slika 27. prikazuje korisničko sučelje.

**Slika 27.** Korisničko sučelje ByVision

Za postizanje odgovarajućeg tlaka i protoka zaštitnog plina prilikom svake promjene debljine radnog komada mjenja se promjer i vrsta sapnice. Kod rezanja uzorka debljine 2,5 mm korištena je sapnica promjera 1,7 mm (oznaka NK1715), kod uzorka debljine 5 mm sapnica promjera 2,5 mm (oznaka HK25), a kod uzorka debljine 10 mm sapnica promjera 3 mm (oznaka NK3020). Slike 28. i 29. prikazuju sapnice korištene tijekom eksperimenta i uređaj za lasersko rezanje ByStar L 4025-65.



Slika 28. Sapnice korištene u eksperimentu a) NK1715 b) HK25 c) NK3020



Slika 29. Uređaj za lasersko rezanje Bystar L 4025-65

12.2. Materijal

Austenitni čelici su zbog svoje dobre korozijske postojanosti, dobre mogućnosti obrade, izvrsne zavarljivosti, mehaničkih svojstava, te estetskih karakteristika najčešće korištena vrsta nehrđajućih čelika. Upotrebljavaju se u svim granama industrije i građevinarstvu za izradu različitih upotrebnih i ukrasnih predmeta. [21]

Austenitni nehrđajući čelik korišten u eksperimentalnom dijelu ovog rada je čelik oznake AISI 316 (*“American Iron and Steel Institute”*). To je legura na bazi željeza koja sadrži nominalno 18% kroma i 11% nikla, uključujući manje količine ugljika, dušika, mangana i silicija. Od osnovnog 18-8 austenitnog čelika razvijeno je desetak novih legura, a bazira se na dodavanju npr. molibdena i dušika zbog bolje otpornosti na koroziju. Austenitni čelici posjeduju visoku istezljivost i žilavost, a ta svojstva ovi čelici zadržavaju i pri sniženim temperaturama. Tablice 15 i 16 prikazuju kemijska i mehanička svojstva nehrđajućeg čelika AISI 316.

Tablica 15. Kemijski sastav nehrđajućeg čelika AISI 316 [18]

C	Si	Mn	Ni	P	S	Cr	Mo	N
≤ 0.07	≤ 1	≤ 2	10 - 13	≤ 0.045	≤ 0.015	16.5-18.5	2 - 2.5	≤ 0.11

Tablica 16. Mehanička svojstva nehrđajućeg čelika AISI 316 [18]

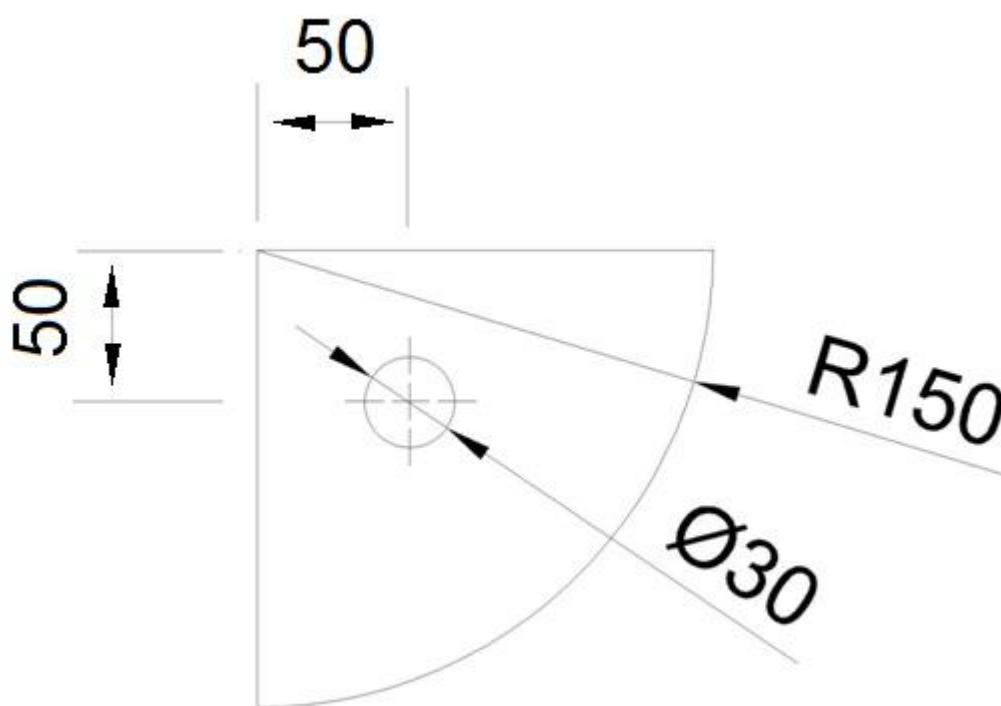
Vlačna čvrstoća, R_m [MPa]	Granica razvlačenja, $R_{p0.2}$ [MPa]	Produljenje, A [%]
520 – 680	240	40

12.3. Plan eksperimenta

Rezanje se izvelo CO₂ laserom na radnim komadima od visokolegiranog nehrđajućeg čeliku. Radni komadi razlikuju se prema debljini uzorka. Sustav za lasersko rezanje korišten u eksperimentu je Bystar L 4025-65 tvrtke Dok-Ing do.o. iz Zagreba čije su karakteristike prikazane tablicom 13. Ovaj sustav koristi izvor laserske zrake ByLaser 6000 proizvođača Bystronic čije su karakteristike prikazane tablicom 14.

Materijal korišten prilikom rezanja je nehrđajući čelik kvalitete AISI 316, debljine 2,5 mm, 5 mm i 10 mm. Osim debljine materijala varijabilni parameter je brzina rezanja (tablica 17.). Uzorci su četvrtine kruga polumjera 150 mm s provrtom u sredini, promjera 30 mm. Nacrt uzorka je prikazan slikom 30.

Prilikom rezanja korištene su tri različite sapnice sa svrhom postizanja odgovarajućeg tlaka i protoka zaštitnog plina u ovisnosti o debljini materijala.



Slika 30. Uzorak za rezanje

Tablica 17. Parametri rezanja

Oznaka uzorka	Debljina materijala [mm]	Tlak plina (N ₂) [bar]	Snaga [W]	Brzina rezanja [mm/min]	Žarišna udaljenost [mm]
2a	2.5	14	4800	4500	1
2b	2.5	14	4800	3600	1
2c	2.5	14	4800	6500	1
5a	5	14	5500	1800	7
5b	5	14	5500	1000	7
5c	5	14	5500	2700	7
10a	10	14	5900	900	10,5
10b	10	14	5900	500	10,5
10c	10	14	5900	1200	10,5

Nakon laserskog rezanja uzoraka provodi se ispitivanje hrapavosti i dimenzijskog odstupanja prema standardu HRN EN ISO 9013:2002. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za precizno mjerenje dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

Prvi korak je ispitivanje hrapavosti površine koje se provodi na uređaju Taylor Hobson MU 58-549, sa svrhom utvrđivanja, uvjetuju li brzina rezanja i debljina materijala promjenu parametra Rz prema kojima se utvrđuje klasa hrapavosti materijala, a zatim se provodi mjerenje dimenzijskog odstupanja (slika 31) da se dobije uvid u tolerancijsku klasu preciznosti stroja.

Zbog unosa topline laserskom zrakom, prilikom rezanja, javlja se zona utjecaja topline (ZUT) u kojoj postoji mogućnost pojave mikrostrukturnih promjena. Uzorci se pripremaju brušenjem i poliranjem za daljnji process elektrolitskog nagrivanja u oksalnoj kiselini kojom se dobiva uvid u zonu utjecaja topline. Analiza zone utjecaja topline se provodi na mikroskopima Leica DFC 295 i Olympus GX51 (slika 32).



Slika 31. Mjerni uređaj Ferranti, Laboratorij za precizna mjerenja dužina, FSB



a)



b)

Slika 32. Prikaz mikroskopa a) Leica DFC 295 b) Olympus GX51

13. ANALIZA REZULTATA

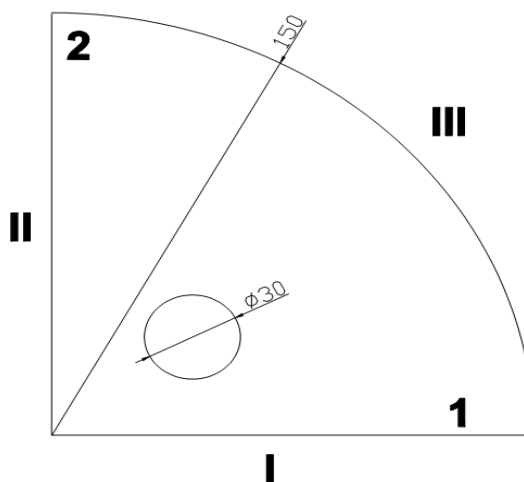
13.1. Hrapavost površine

Tehničke površine nisu idealno glatke geometrijske plohe koje razdvajaju dva medija, već su to, mikroskopski gledano, hrapave plohe karakterizirane nizom neravnina različitih veličina, oblika i rasporeda. Posljedica tome su različite tehnologije obrade materijala. Veličina hrapavosti može utjecati na:

- Smanjenje dinamičke izdržljivosti (odnosno, smanjenje čvrstoće oblika);
- Pojačano trenje i habanje tribološki opterećenih površina;
- Ubrzavanje korozije.

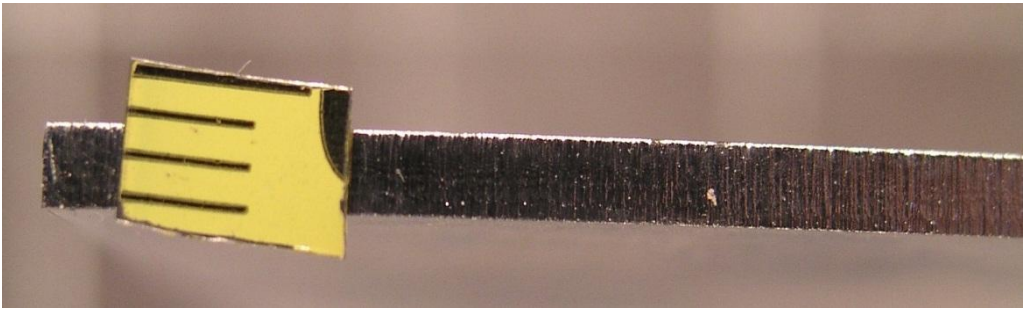
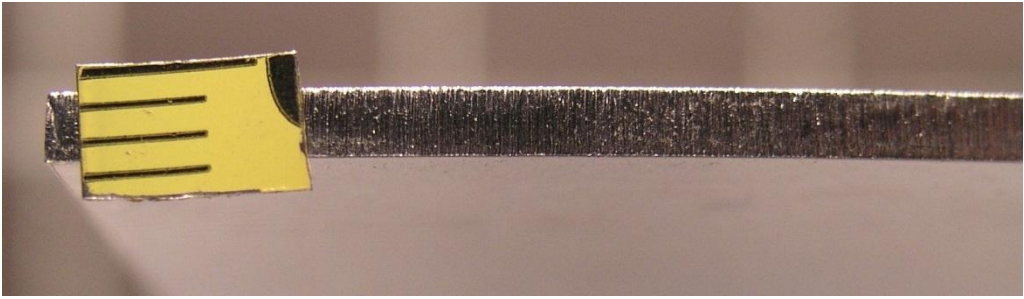
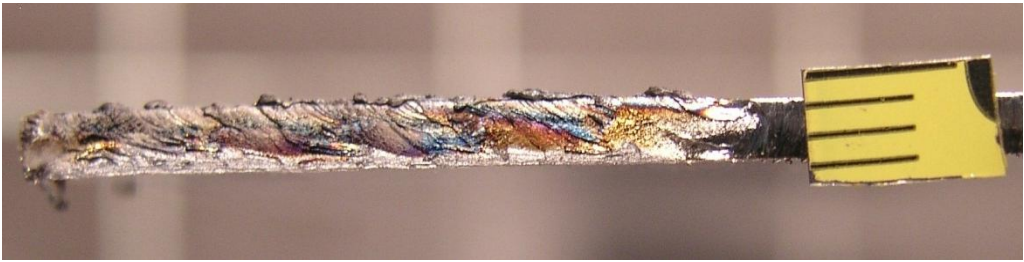
Mjerenje hrapavosti uzoraka izvršeno je u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina (FSB) na uređaju Taylor Hobson MU 58-549 . Izrezani uzorci su debljina 2,5 mm, 5 mm i 10 mm. Hrapavost površine, na uzorcima debljine 2,5 mm, se mjerila u duljini od 4 mm dok je kod uzoraka od 5 i 10 mm duljina mjerenja bila 14 mm, i to u smjeru rezanja. Osim veličine R_z (prosječna visina neravnina), izmjerena je i veličina R_a – srednji iznos hrapavosti.

Svi uzorci kao i izmjerene veličine su prikazane tablicama 18, 19 i 20.

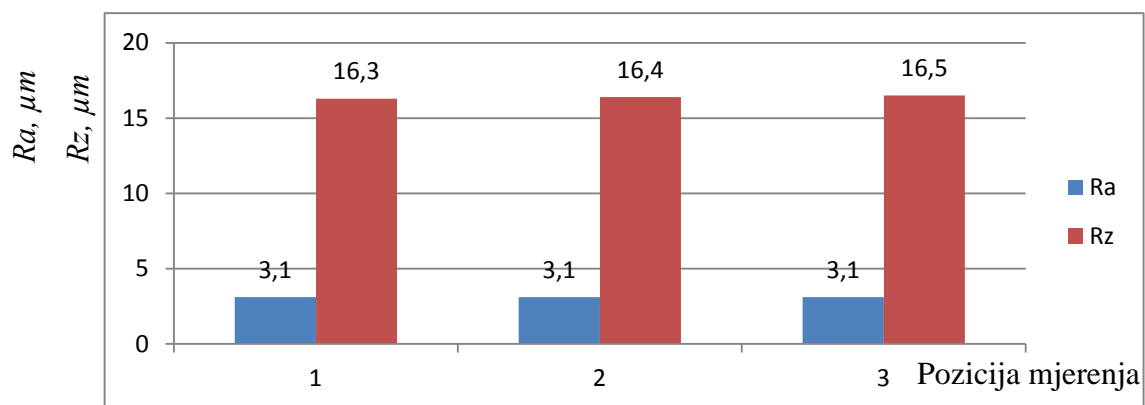


Slika 33. Prikaz pozicija za mjerenje

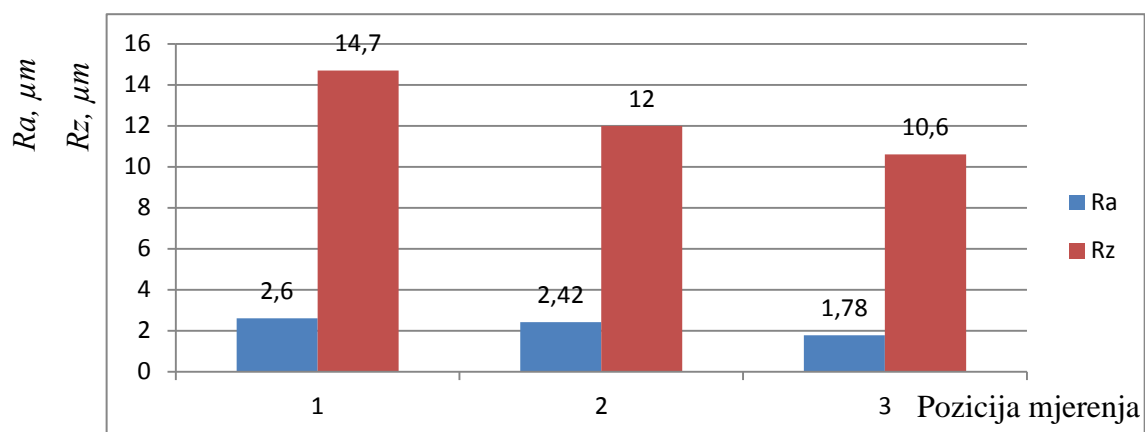
Tablica 18. Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine

2a			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 3,10;$ $Rz = 16,3$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 2,80;$ $Rz = 16,4$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 1,62;$ $Rz = 8,0$	Klasa 1
2b			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 2,60;$ $Rz = 14,7$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 2,42;$ $Rz = 12,0$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 1,78;$ $Rz = 10,6$	Klasa 1
2c			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 2,21;$ $Rz = 12,9$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 2,03;$ $Rz = 11,4$	Klasa 1
	Hrapavost III, μm	$Ra = 3,61;$ $Rz = 20,2$	Klasa 2

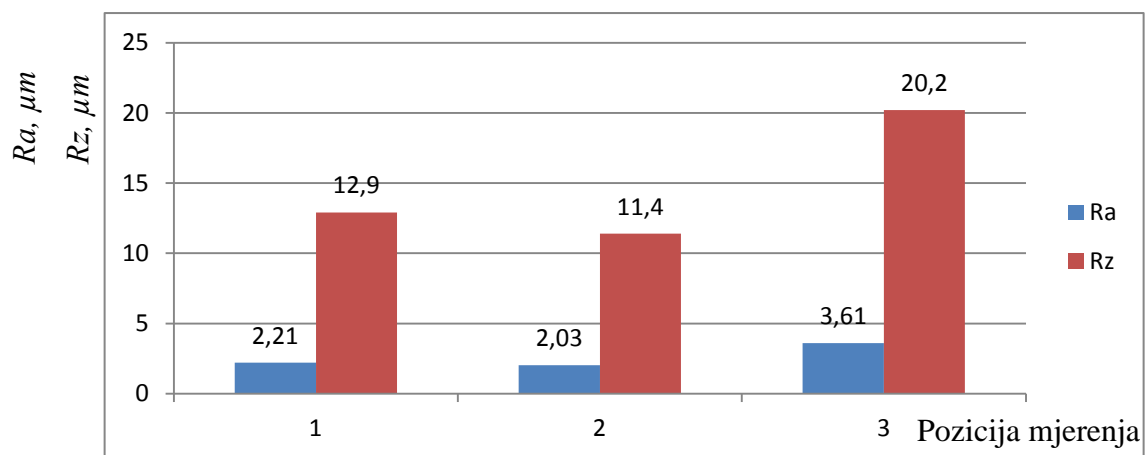
Na slikama 34, 35 i 36 prikazana je grafička analiza dobivenih rezultata hrapavosti površine za uzorke debljine 2,5 mm.



Slika 34. Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2a)

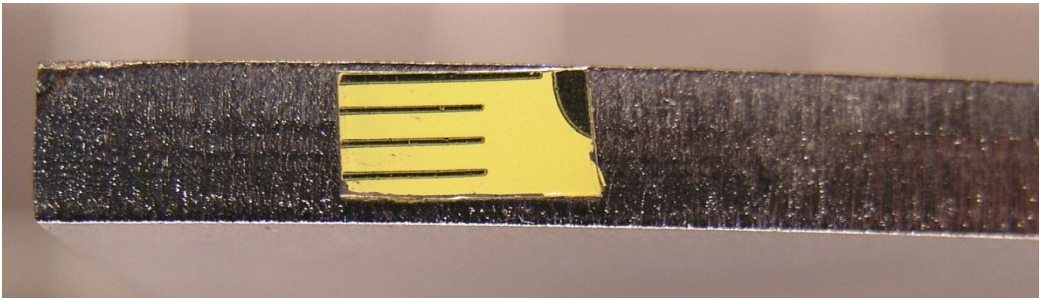
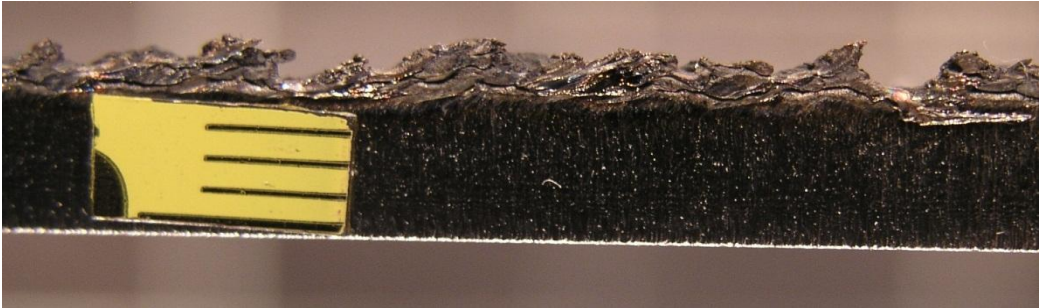
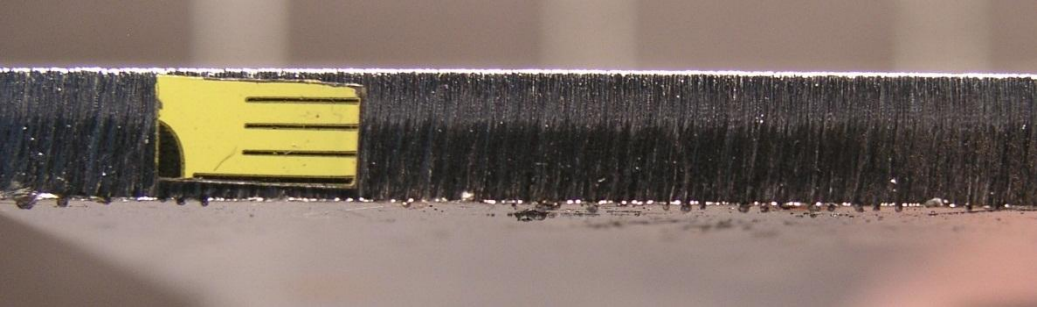


Slika 35. Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2b)

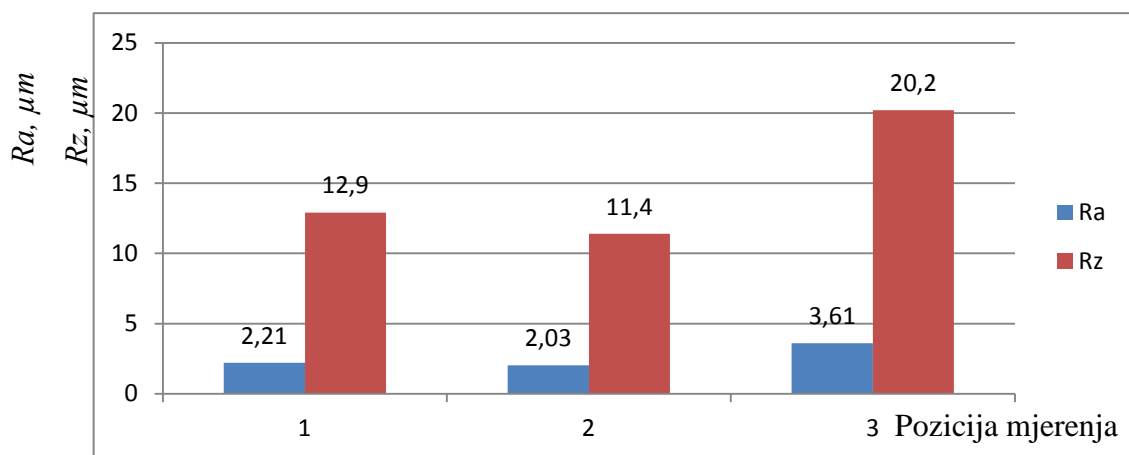


Slika 36. Grafički prikaz rezultata hrapavosti površine uzorka debljine 2,5 mm (2c)

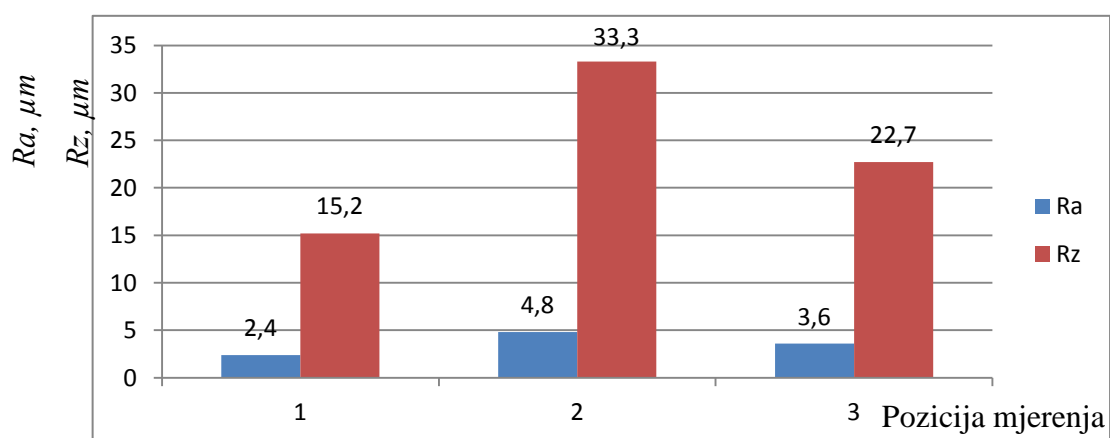
Tablica 19. Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine

5a			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 4,0;$ $Rz = 22,1$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 3,9;$ $Rz = 24,8$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 2,61;$ $Rz = 17,4$	Klasa 2
5b			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 2,4;$ $Rz = 15,2$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 4,8;$ $Rz = 33,3$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 3,6;$ $Rz = 22,7$	Klasa 2
5c			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 4,2;$ $Rz = 23,7$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 4,0;$ $Rz = 24,2$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 2,8;$ $Rz = 21,4$	Klasa 2

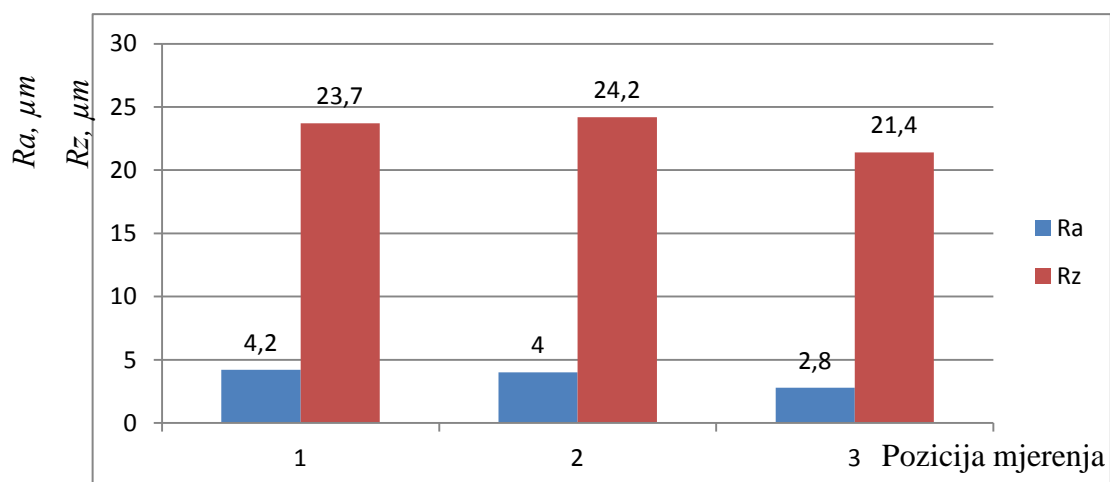
Na slikama 37, 38 i 39 prikazana je grafička analiza dobivenih rezultata hrapavosti površine za uzorke debljine 5 mm.



Slika 37. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5a)

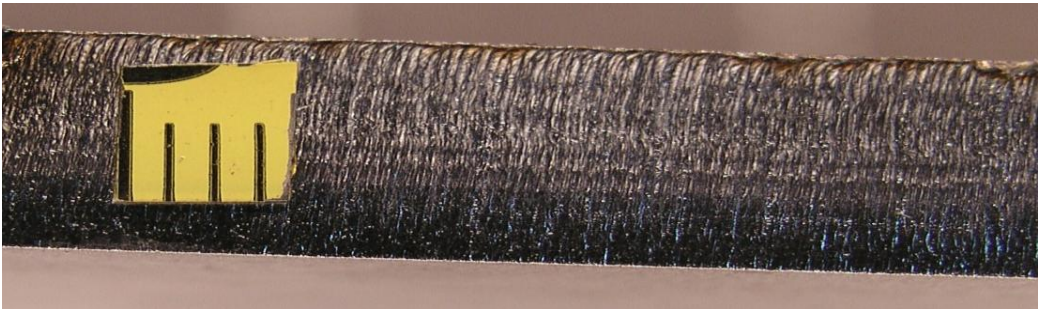
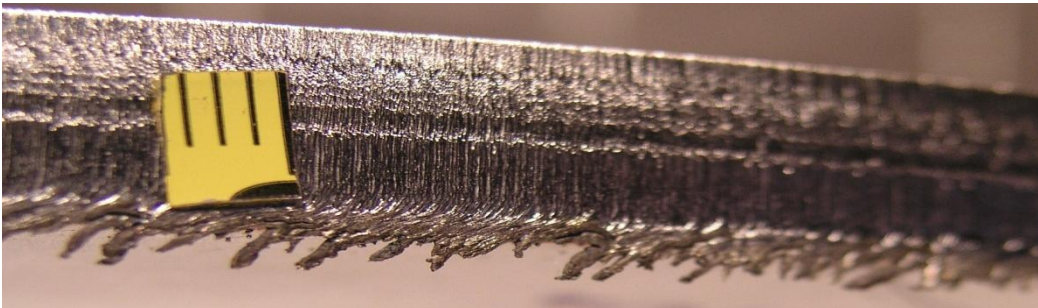
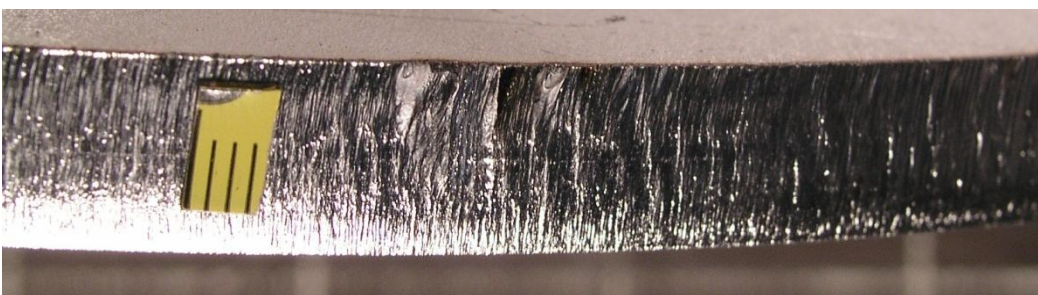


Slika 38. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5b)

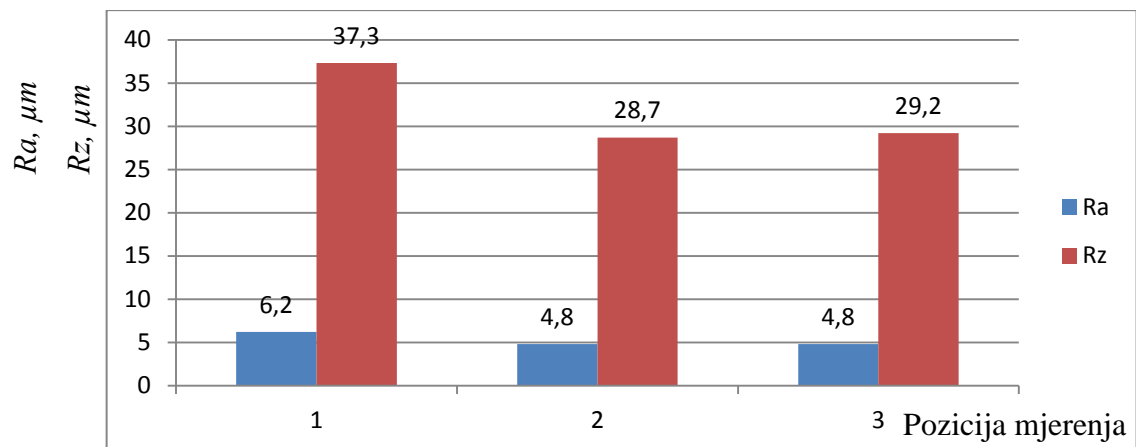


Slika 39. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 5 mm (5c)

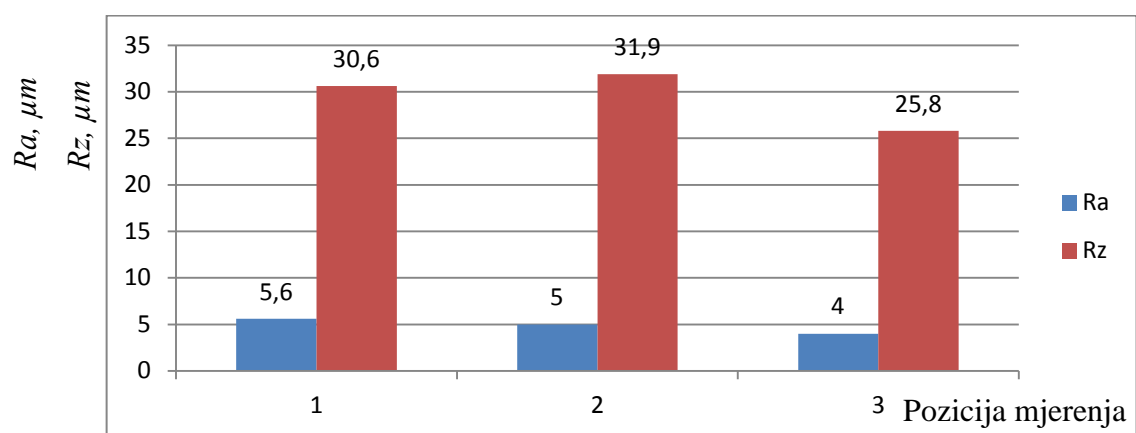
Tablica 20. Prikaz uzoraka nakon rezanja s odgovarajućim vrijednostima hrapavosti površine

10a			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 6,2;$ $Rz = 37,3$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 4,8;$ $Rz = 28,7$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 4,8;$ $Rz = 29,2$	Klasa 2
10b			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 5,6;$ $Rz = 30,6$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 5,0;$ $Rz = 31,9$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 4,0;$ $Rz = 25,8$	Klasa 2
10c			
	Hrapavost I, μm	$Ra = 4,4;$ $Rz = 27,6$	Klasa 2
	Hrapavost II, μm	$Ra = 4,8;$ $Rz = 31,9$	Klasa 2
	Hrapavost III, μm	$Ra = 10,0;$ $Rz = 54,1$	Klasa 3

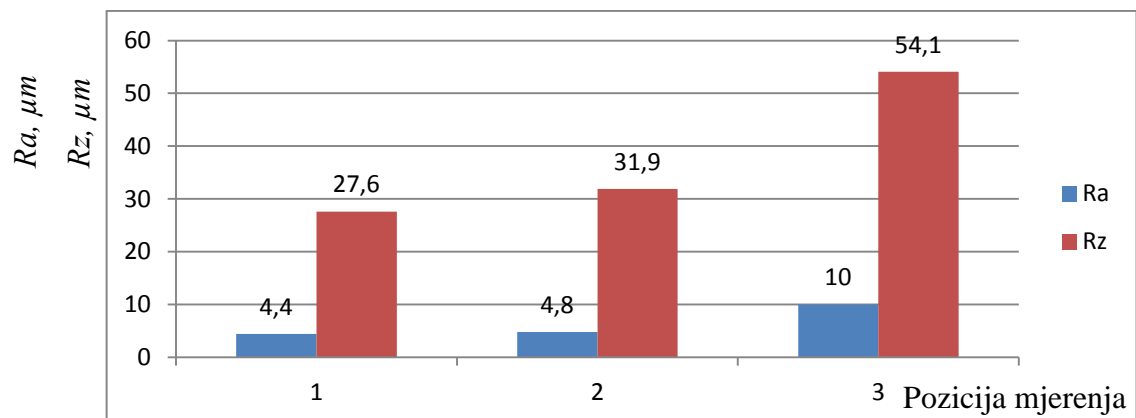
Na slikama 40, 41 i 42 prikazana je grafička analiza dobivenih rezultata hrapavosti površine za uzorke debljine 10 mm.



Slika 40. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10a)



Slika 41. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10b)



Slika 42. Grafički prikaz rezultata hrapavosti uzorka debljine 10 mm (10c)

Na slikama se vidi utjecaj brzine rezanja na značajke kvalitete reza. Vidi se da premala (uzorak 2c) ili prevelika brzina rezanja (uzorci 5b i 10b) dovodi do grešaka na površini reza. Kao rezultat takvih brzina je povećana hrapavost te pojava srha na donjem rubu reza. Na uzorcima izrezanim s prevelikom brzinom rezanja pojavljuje se preveliki zaostatak utora u donjem dijelu, pojedinačna udubljenja i izostanak procesa rezanja.

Uzorci izrezani s optimalnim parametrima daju dobru kvalitetu reza s minimalnom hrapavošću, te se na njima ne javlja srh s donje strane reza, samim tim su prihvatljivi za zavarivanje bez prethodne obrade.

Nadalje prema normi HRN EN ISO 9013 klasificirana je hrapavost površine, odnosno prosječna visina neravnina - R_z . Prema tablici 9. i slici 26. određena je klasa hrapavosti pojedinih uzoraka. U spomenutoj tablici nalaze se rasponi veličine R_z za pojedinu klasu hrapavosti, tako npr. da bi se postigla prva klasa hrapavosti potrebne su vrijednosti $10 + (0,6a \text{ mm})$ u μm , gdje je a debljina materijala. Dok su na slici 26. prikazane klase hrapavosti u ovisnosti o dobivenim vrijednostima i debljini radnog komada. Iz rezultata veličine R_z , vidljivo je da uz optimalne parametre rezanja možemo najviše postići prvu ili drugu klasu ili područje hrapavosti.

U prvu klasu spada pozicija III na uzorku 2a, dok ostali uzoraci spadaju u drugu klasu hrapavosti. Najveća hrapavost je izmjerena na poziciji III na uzorku 10c te ona spada u treću klasu hrapavosti što nije zadovoljavajuće.

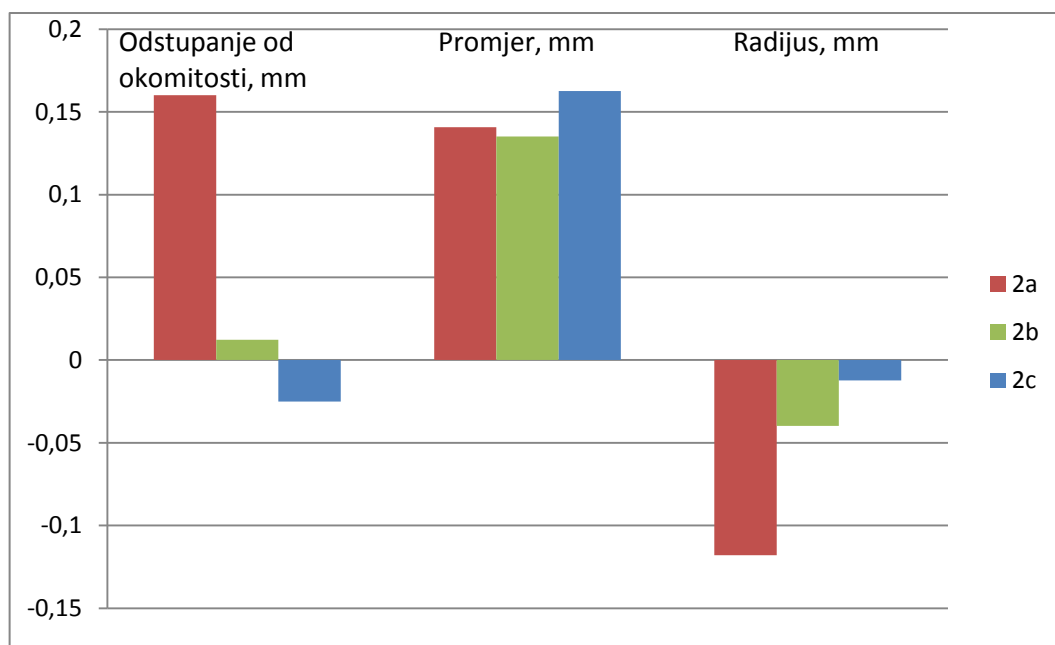
Iako je većina uzoraka u drugoj klasi hrapavosti, laserskim rezanjem se teži prvoj klasi što nam ukazuje da brzine rezanja koje su korištene u ovom eksperimentu nisu adekvatne za upotrebu u stvarnoj proizvodnji s visokim zahtjevima, jer nisu odabrane po iskustvu već po literaturi.

13.2. Dimenzijska odstupanja

Odstupanje od okomitosti, promjer i radijus izmjereni su korištenjem trokoordinatnog mjernog uređaja Ferranti, oznake MU 25-201 (slika 31.). Iz rezultata navedenih u tablicama 21, 22 i 23 vidi se da rezultati spadaju u tolerancijsku klasu 1 po podacima iz tablice 10.

Tablica 21. Dimenzijska odstupanja uzoraka od 2,5 mm

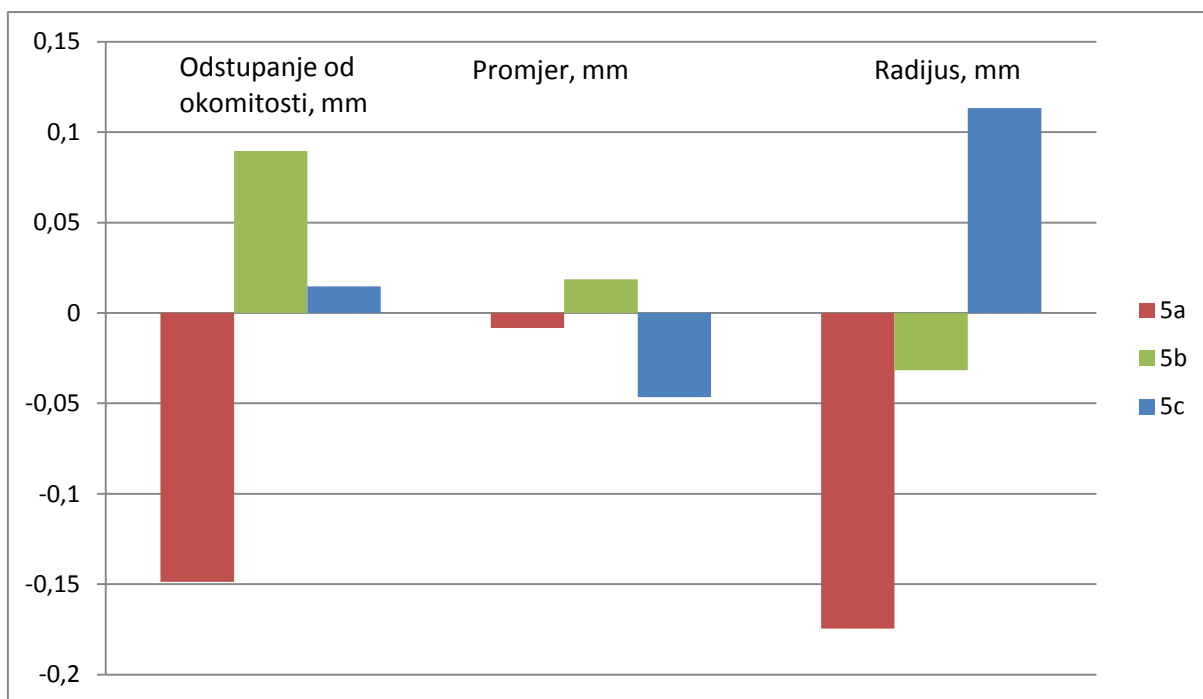
Oznaka	Mjerna značajka	Izmjerena vrijednost
2a	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,1602
	Promjer, mm	30,1408
	Radijus,mm	149,8820
2b	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,0123
	Promjer, mm	30,1351
	Radijus,mm	149,9603
2c	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	-0,0251
	Promjer, mm	30,1626
	Radijus,mm	149,9876



Slika 43. Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja za uzorke debljine 2,5 mm

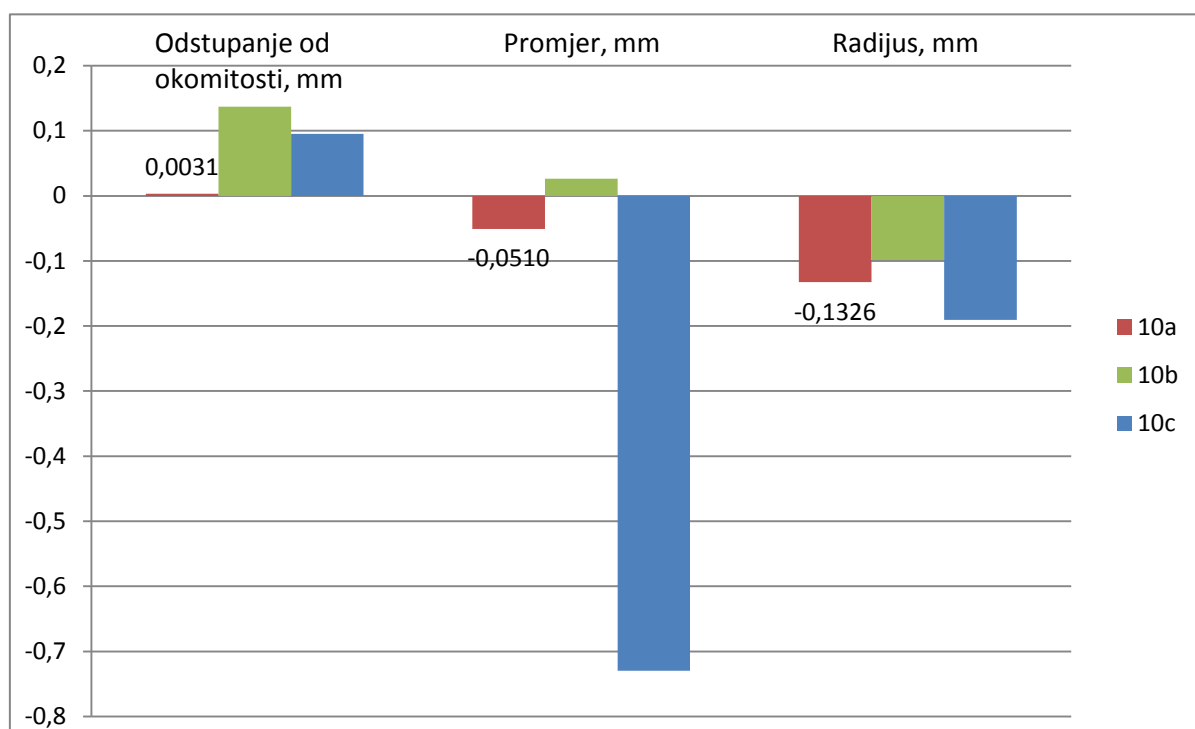
Tablica 22. Dimenzijska odstupanja uzoraka od 5 mm

5a	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	-0,1487
	Promjer, mm	29,9917
	Radijus,mm	149,8254
5b	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,0895
	Promjer, mm	30,0186
	Radijus,mm	149,9684
5c	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,0147
	Promjer, mm	29,9534
	Radijus,mm	150,1132

**Slika 44.** Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja uzoraka debljine 5 mm

Tablica 23. Dimenzijska odstupanja uzoraka od 10 mm

10a	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,0031
	Promjer, mm	29,9490
	Radijus,mm	149,8674
10b	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,1369
	Promjer, mm	30,0266
	Radijus,mm	149,9016
10c	Odstupanje od okomitosti, stranica 1 i 2, mm	0,0953
	Promjer, mm	29,2700
	Radijus,mm	149,8094

**Slika 45.** Grafički prikaz dimenzijskog odstupanja uzoraka debljine 10 mm

13.3. Širina zone utjecaja topline

Toplina unesena laserskim rezanjem stvara zonu utjecaja topline (ZUT) do ruba reza. ZUT je dio materijala na čija je metalurška svojstva utjecala topline, ali se nije rastalio. Mikrostrukturne varijacije u zoni utjecaja topline su jedne od karakteristika koje određuju kvalitetu laserskog reza. Širina ZUT-a se povećava kako se povećava gustoća unesene topline i debljina materijala. [14]

Formiranje zone utjecaja topline (ZUT) za vrijeme rezanja austenitnog nehrđajućeg čelika se smatra zanemarivim jer materijal nije otvrdio utjecajem topline. Međutim, provođenje topline u materijal može dovesti do promjene zrna, stvaranja karbida, sulfidnih ili fosfatnih nečistoća koji postoje kao legirni elementi što ima za uzrok vidljivu zonu utjecaja topline. Analiza mikrostrukture zone utjecaja topline je provedeno u tri faze:

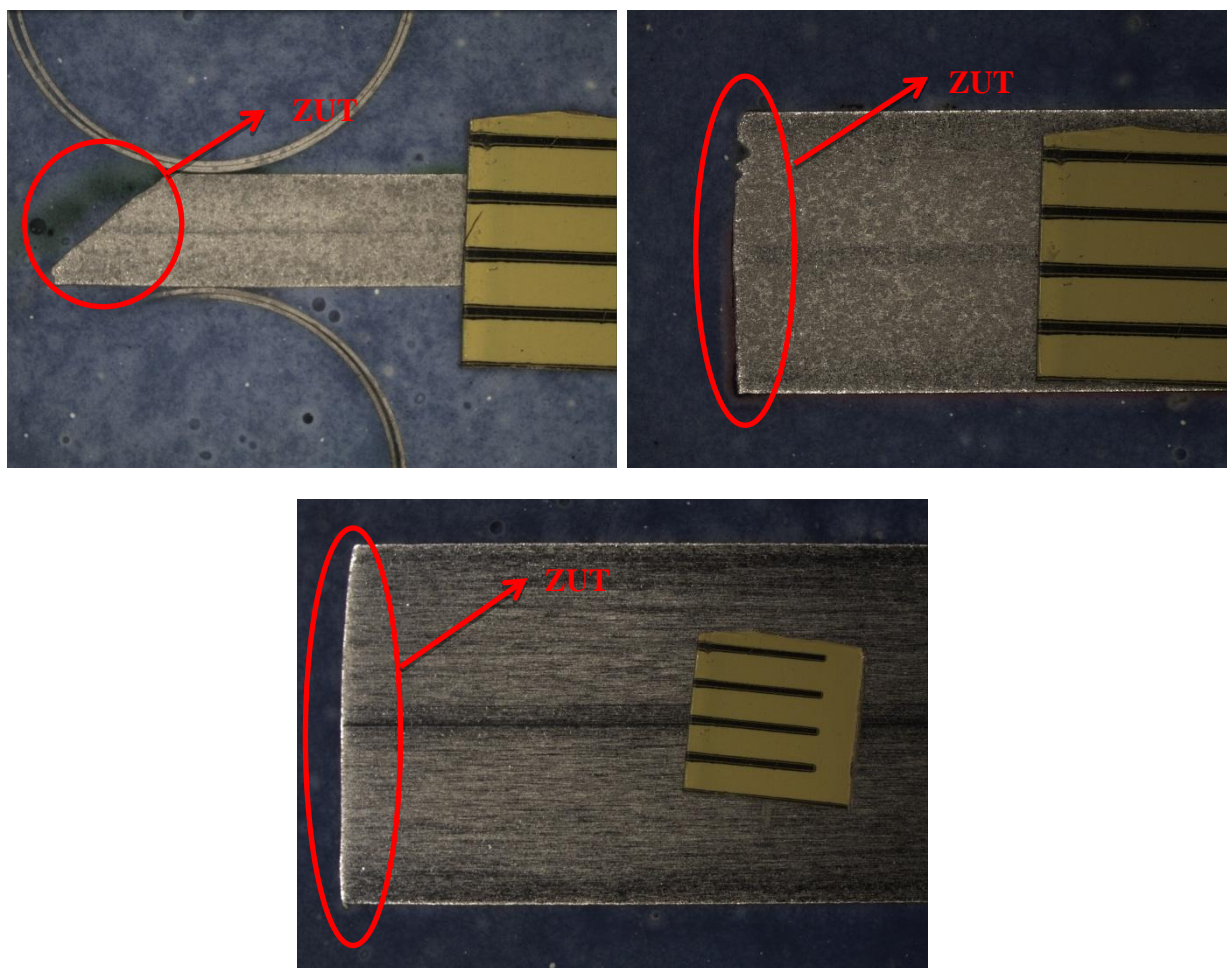
- Brušenje;
- Poliranje;
- Nagrizanje.

Brušenje uzoraka provedeno je strojno na brusnom papiru granulacije 120, 240, 360, 400, 600 zrna / mm², dok je poliranje uzoraka provedeno je na polirnoj krpi. Nagrizanje je izvršeno u otopini oksalne kiseline u uređaju za elektrolitsko nagrizanje (slika 46.). Otopina sadrži 100g oksalne kiseline i 1000ml vode. Nagrizanje se višilo u Laboratoriju za zaštitu materijala, FSB.

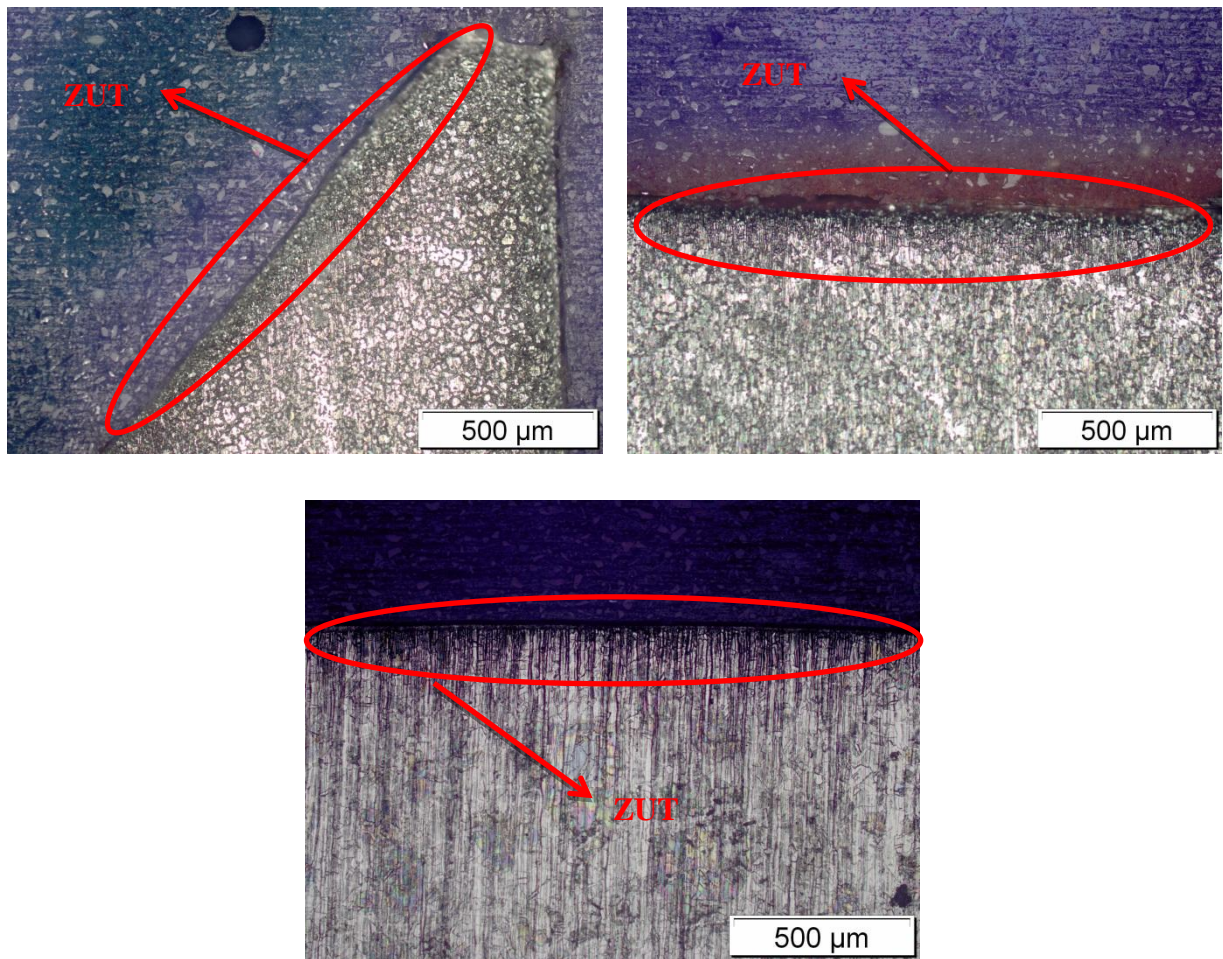


Slika 46. Uređaj za elektrolitsko nagrizanje

Nakon nagrizanja uzorci su slikani na svjetlosnom mikroskopu Leica DFC 295 (slika 32) u Laboratoriju za zaštitu materijala (FSB) pod povećanjem od 12.5x za uzorke 2.5 i 5 mm debljine, te povećanjem od 7.88x za uzorak 10 mm debljine. Iz slike 47 je vidljivo da je zona utjecaja topline zanemarivo mala te su uzorci ponovno slikani pod povećanjem od 100x na mikroskopu Olympus GX51 (slika 32) u Laboratoriju za materijalografiju. Također i s povećanjem od 100x zona utjecaja topline nije značajna kao što je vidljivo na slici 48.



Slika 47. Uzorci pod povećanjem od 12.5x



Slika 48. Uzorci pod povećanjem od 100x

Analizom uzoraka na mikroskopima Olympus GX51 i Leica DFC 295 (slika 32) nisu uočene značajne promjene mikrostrukture u zoni utjecaja topline, što znači da je odabrana tehnologija rezanja s optimalnim parametrima odgovarajuća. Uzorci mogu biti podvrgnuti zavarivanju bez naknadne strojne obrade površine reza.

14. ZAKLJUČAK

Novi laseri krutog stanja, disk i fiber laseri, omogućuju kombinaciju visoke kvalitete zrake sa valnom duljinom koja se lako apsorbira u površinu metala te su zbog toga direktna konkurencija starijim postupcima, CO₂ i Nd:YAG. Izlazna snaga disk i fiber lasera dostiže visoke snage bez štetnih posljedica na kvalitetu zrake. Ovakvi sustavi su pouzdani za aplikaciju jer njihova visoka kvaliteta zrake omogućava veliku gustoću snage što je bitno za povećanje brzine rezanja, a samim time i efikasnosti.

Uspoređujući opisane vrste lasera te potrebne parametre za efikasno provođenje postupka, zaključeno je da su fiber i disk laseri najpogodniji za rezanje tanjih ploča od nehrđajućeg čelika uz upotrebu inertnog plina, dok su CO₂ laseri pogodniji za rezanje debljih materijala.

U eksperimentu su rezani uzorci debljina 2,5, 5 i 10mm od nehrđajućeg čelika kvalitete AISI 316. Brzina rezanja je varijabilni parametar s ciljem provjere ovisnosti kvalitete reza o brzini rezanja. Bile su predviđene tri brzine rezanja za odgovarajuću debljinu materijala, optimalna prespora i prebrza.

Prespora i prebrza brzina rezanja su dale nepovoljne rezultate u vidu kvalitete reza i u vidu povećane hrapavosti (tablice 16., 17. i 18.) te u stvaranju srha sa donje strane uzorka koji zahtjeva dodatnu obradu.

Iz eksperimenta se vidi da iako je brzina rezanja bitan faktor što se tiče ekonomičnosti proizvodnje, nepravilnosti koje se mogu javiti ubrzavanjem ili usporavanjem procesa rezanja mogu dovesti do grešaka koje dodatno poskupljuju troškove kroz naknadnu obradu te onemogućuju zavarivanje ili montažu bez dodatnih radnji.

Optimalne brzine rezanja radnih komada postignute u eksperimentu su: za debljine radnog komada 2,5 mm 3,6 m/min, za debljine radnog komada 5 mm 1 m/min, a za debljine radnog komada 10 mm 0,5 m/min. S navedenim brzinama rezanja postignuta je hrapavost površine druge klase. Iz ovog se zaključuje da odabir odgovarajućih parametara uvelike ovisi je li težište na ekonomičnosti procesa ili na kvaliteti izrade.

15. LITERATURA

- [1] Bauer, B.: Doktorski rad, Optimiranje parametara laserskog zavarivanja čelika za poboljšavanje; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [2] Roфин: Introduction to Industrial Laser Materials Processing; Hamburg, 2006.
- [3] http://www.rofin.com/uploads/pics/PR_Daimler_5000Slab_D_FINAL_2.jpg , dostupno 04/2013.
- [4] http://img.mfrbee.com/photo/v2/245041731/TruCoax_2000_laser_machine.jpg, dostupno 04/2013.
- [5] http://www.trumpf-machines.com/fileadmin/DAM/trumpf-machines.com/Produkte/Prospekte/englisch/TruLaser_Series_1000_en.pdf, dostupno 04/2013.
- [6] http://www.rofin.com/en/info_center/brochures_and_datasheets/, dostupno 04/2013.
- [7] Wandera, C.: Diplomski rad, Laser Cutting of Austenitic Stainless Steel with a High Quality Laser Beam; Lappeenranta University of Technology, 2006.
- [8] <http://www.trumpf-laser.com/en/products.html>, dostupno 04/2013.
- [9] <http://www.ipgphotonics.com/>, dostupno 04/2013.
- [10] Petring, D: "Laser Cutting", LIA Handbook of Laser Materials Processing, 2001
- [11] Natarajan, R.: "An experimental and theoretical study of heat transfer effects during a laser-cutting process", Iowa, 1990
- [12] Powell, J.: "CO2 Laser Cutting", 1993
- [13] <http://www.emachineshop.com/machines-kerf/laser-cutting.htm>, dostupno 11/2012
- [14] Ion, J.: "Laser Processing of Engineering materials", 2005.
- [15] Berkmanns, J.; Faerber, M.: "Laser cutting, LASERLINE® Technical", Germany, 2008.
- [16] Dr. Bachmann, Föcking, Frauenpreiss, Krumeich, Lunding, Holt, Rütering:" Introduction to Industrial Laser Materials Processing", Roфин, Hamburg, Germany, 2000.

- [17] HRN EN ISO 9013: Toplinsko rezanje – Razredba rezova – Geometrijska specifikacija proizvoda i dozvoljena odstupanja kakvoće (ISO 9013:2002; EN ISO 9013:2002)
- [18] EN ISO 10088-2: 2005: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
- [19] http://www.redsteelbg.com/opencms/opencms/menu/en/education_center/choosing_plasma/
- [20] <http://www.kjellberg.cz/plasma/eng/ewasplasma.html>
- [21] Spaehn H.: „Performace Requirements of Stainless Steel in the Chemical Process Industry“. Metal Progress-2, 1979. Juraga I.: „Zavarivanje čelika otpornih na koroziju“, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [22] Juraga I.: „Zavarivanje čelika otpornih na koroziju“, Časopis Zavarivanje, siječanj 1994.
- [23] Juraga, I., Šimunović, V.; Stojanović I.: „Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Pula, 2007
- [24] Andrić, Š.; Juraga, I.; Grubić, K.; Jarić M.: „Visokolegirani martenzitni čelici i neki problemi pri njihovom zavarivanju“, Časopis Zavarivanje, veljača, 1988
- [25] Lippold, J.C.; Kotecki D.J.: „Welding Metallurgy and Weldability Of Stainless Steels“, 2005.
- [26] Harničárová, M.; Valíček, J.; Zajac, J.; Hloch, S.; Čep, R.; Džubáková, I.; Tofil, S.; Hlaváček, P.; Klich, J.; Čepová, L.: „Techno-economical comparison of cutting material by laser, plasma and Oxygen“, 2012.